EIN GEWEBEÄQUIVALENTES KALORIMETER ZUR DOSIMETRIE IN GEMISCHTEN STRAHLENFELDERN

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der

Freien Universität Berlin

Fachbereich Physik

vorgelegt von

Peter Kisten

aus Berlin

- Dezember 1970 -

1. Gutachter:	Prof. Dr. K. H. Lindenberger
2. Gutachter:	Prof. Dr. H. Oeser
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Dezember 1970
Tag der Promotion:	

EIN GEWEBEÄQUIVALENTES KALORIMETER ZUR DOSIMETRIE IN GEMISCHTEN STRAHLENFELDERN

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der

Freien Universität Berlin

Fachbereich Physik

vorgelegt von

Peter Kisten

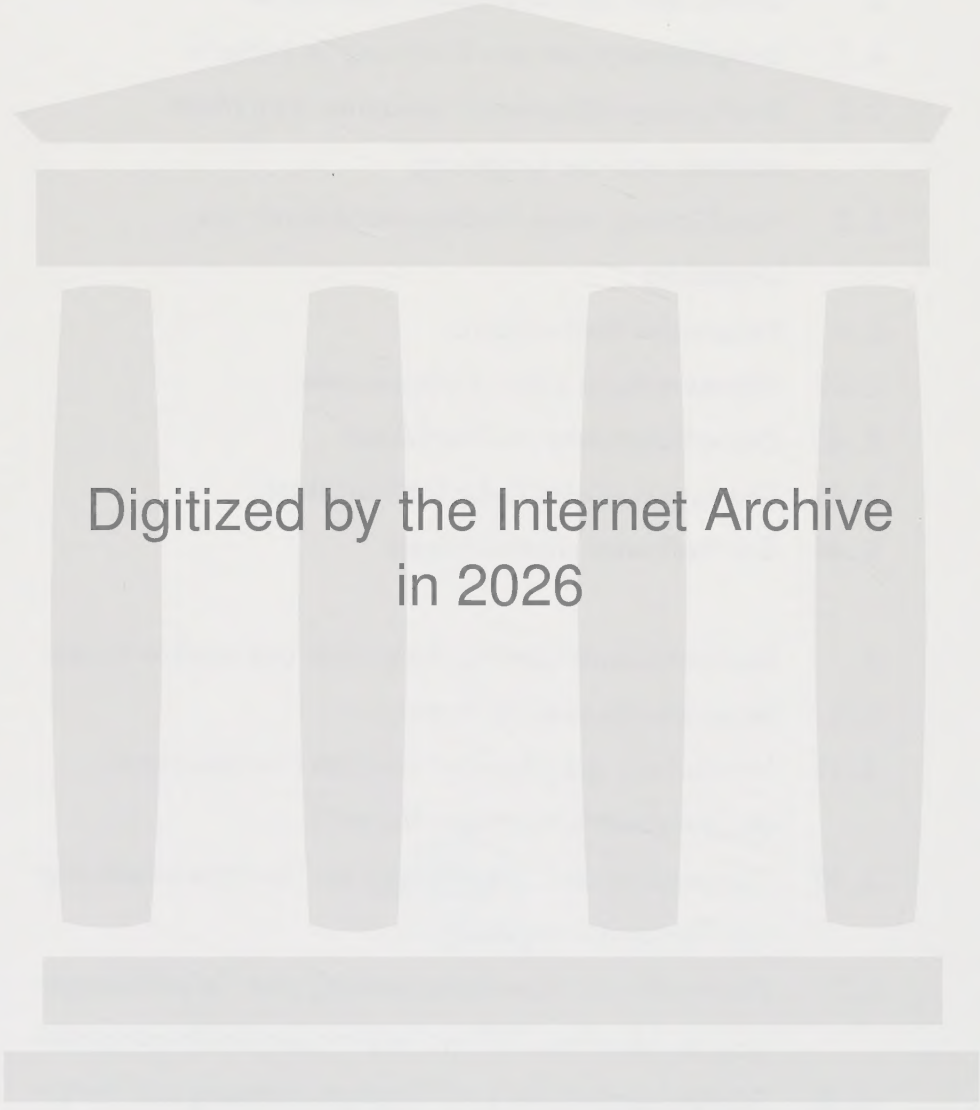
aus Berlin

- Dezember 1970 -

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Zusammenfassung		1
1	Einleitung und Problemstellung	2
2	Grundlagen der kalorischen Dosimetrie	5
2.1	Energieabsorption von Strahlung in Materie	5
2.2	Strahlungsgleichgewicht zwischen dem Meßvolumen und der Umgebung	8
2.3	Abschirmung eines Meßvolumens durch die Umgebung	9
2.4	Kalorische Meßverfahren	12
2.41	Wärmeverluste eines Meßvolumens	12
2.42	Das adiabatische Meßverfahren	15
2.43	Das quasi-adiabatische Meßverfahren	17
2.44	Das isotherme Meßverfahren	19
3	Dosimeterkonstruktion, Elektronik und Meßverfahren	21
3.1	Bauelemente des Dosimeters	21
3.11	Herstellung des Absorbers und des Wärmeisolators aus gewebeäquivalentem Material	24
3.12	Verwendung von Thermistoren zur Temperaturmessung und Temperaturregelung	31
3.2	Elektronik zur Temperaturmessung und Heizstromregelung in Absorber, Wärmeisolator und Dosimeterkapsel	38
3.21	Gleichstrombrücke zur Temperaturmessung und Heizstromregelung	42
3.22	Verstärker zur Heizstromregelung bei Verwendung einer Gleichstrombrücke	45
3.23	Wechselstrombrücke zur Temperaturmessung und Gleichstromheizung des Absorbers und des Wärmeisolators	46


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548902_0016

Seite

3.3 Durchführung der kalorischen Messungen 49
3.31 Das adiabatische Meßverfahren 51
3.32 Das isotherme Meßverfahren 54

4 Ergebnisse und Diskussion 56
4.1 Verwendete Strahlenquellen und Vergleichsdosimeter 56
4.2 Elektrische und thermische Eigenschaften des Wärmeisolators 57
4.3 Einfluß der Außenheizung auf die Wärmeisolation des Absorbers und des Wärmeisolators 58
4.4 Quasi-adiabatische Dosismessung 63
4.5 Adiabatische Dosismessung 67
4.6 Isotherme Messung der Energiedosisleistung 69
4.7 Vergleich der Meßmethoden 77

5 Anhang 83

6 Literaturverzeichnis 90

Zusammenfassung

Zur Messung der Energiedosis und Energiedosisleistung im gemischten Neutronen- und γ-Strahlenfeld wurde ein Vakuum-Kalorimeter entwickelt, mit dem der Nachweis der absorbierten Energie nach der adiabatischen- und isothermen Meßmethode möglich ist.
Das Meßvolumen und die umgebende Wärmeisolation wurden aus einer von SHONKA (1) angegebenen Material-Mischung hergestellt, die sich in ihren Absorptionseigenschaften äquivalent zu Muskelgewebe verhält. Die elektrische Leitfähigkeit der SHONKA-Plastik wurde reduziert, so daß Absorber und Wärmeisolation direkt heizbar sind und dadurch bei der Eichung im Meßvolumen eine annähernd gleiche Wärmeverteilung wie bei den Absorptionsmessungen besteht.

Die Temperaturmessung und Heizstromregelung wurde mit Thermistoren durchgeführt, nachdem ihre Verwendbarkeit in dem zu untersuchenden Dosisbereich geprüft worden war.

Die Empfindlichkeit beim adiabatischen Verfahren ist oberhalb von 50 rad/min unabhängig von der Dosisleistung und beträgt 3.45° C/Mrad, die untere Nachweisgrenze von 30 rad/min bei einer Meßzeit von 10 Min., das heißt von 300 rad wird durch die noch meßbare Temperaturänderung von $1 \cdot 10^{-3}$ °C bestimmt.
Die Empfindlichkeit beim isothermen Verfahren ist unabhängig von der Dosisleistung und Bestrahlungsdauer, so daß Langzeitmessungen durchgeführt werden können. Durch die hohe Empfindlichkeit von $0.16 \frac{\mu W/g}{rad/min}$ liegt die untere Nachweisgrenze bei einer Dosisleistung $\dot{D} \approx 4$ rad/min. Im Gegensatz zur verzögerungsfreien Anzeige bei adiabatischen Messungen haben isotherme Messungen eine Relaxationszeit in der Größenordnung von zwei bis fünf Minuten.

1 Einleitung und Problemstellung

Die durch physikalische Wechselwirkungsprozesse von ionisierender Strahlung auf Materie übertragene Energie führt zu einer Erwärmung des bestrahlten Materials. Unter der Voraussetzung, daß kein Energieverlust durch Wärmetransport nach Außen eintritt und die gesamte absorbierte Energie in Form von Wärme in Erscheinung tritt, kann die von dem bestrahlten Material absorbierte Energie direkt mit einem Kalorimeter absolut gemessen werden. Das Kalorimeter summiert die absorbierte Energie aller Strahlenarten und ist deshalb besonders geeignet zum Nachweis der Energieabsorption in Materie bei Bestrahlung mit gemischter Neutronen- und γ-Strahlung, wie sie im Bereich von Kernreaktoren und Beschleunigern auftritt.

Die Schwierigkeit bei der Anwendung der Kalorimetrie ist die geringe Empfindlichkeit der Meßmethode, die durch die Genauigkeit der Temperaturmessung in der bestrahlten Materialprobe begrenzt wird.
Da die kalorische Meßmethode zur Bestimmung der absorbierten Energie nur von der atomaren und nicht von der molekularen Struktur des Materials abhängt, werden Meßfehler vermieden, die in chemischen Dosimetern auftreten können. Außerdem ist die Empfindlichkeit kalorischer Dosimeter unabhängig von der LET.*

Die Aufgabe dieser Arbeit war es, ein kalorisches Dosimeter zu entwickeln, das es ermöglicht, mit demselben Dosimeter sowohl nach der adiabatischen wie auch nach der isothermen Meßmethode die Energieabsorption im gemischten Strahlenfeld zu bestimmen und die Empfindlichkeit und erreichbare untere Nachweisgrenze beider Meßmethoden miteinander zu vergleichen. Dabei wurde angestrebt, eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erreichen, um Dosisleistungsmessungen bis zu einer unteren Grenze von einigen rad/h ausführen zu können.

Zur Temperaturmessung werden Thermistoren verwendet, obwohl durch Strahlenschädigung eine Änderung der Widerstandseigenschaften eintreten kann und

---

*) lineare Energieübertragung, örtlich durch ein geladenes Teilchen auf die Materie übertragene Energie, LET ≈ dE/dx

dadurch die Verwendbarkeit des Kalorimeters bei hoher Intensität der gemessenen Strahlung begrenzt sein wird. In dem hier untersuchten Dosisbereich trat keine Strahlenschädigung der Thermistoren auf. Der Vorteil der Thermistoren gegenüber den sonst üblichen Thermoelementen ist ihre große Temperaturempfindlichkeit und die kleinen Abmessungen der verwendeten Typen.

Das absorbierende Material war zuerst p-Therphenyl, das als organisches Kühlmittel und Moderator bei Reaktoren Verwendung gefunden hat. Durch die für kalorische Messungen ungeeigneten Materialeigenschaften waren die Meßergebnisse so unbefriedigend, daß die Versuche ohne Erfolg abgebrochen werden mußten.

Zur Bestimmung der Energiedosis in Gewebe wurden die Messungen mit einem Material fortgesetzt, das menschlichem Gewebe entspricht. Da menschliches Gewebe zu 90 % aus weichem Gewebe besteht (zum Beispiel Muskel-, Organ- und Bindegewebe) wird ein Material verwendet, das sich in allen seinen Absorptionseigenschaften im gemischten Neutronen- und γ-Strahlenfeld annähernd äquivalent zu Muskelgewebe verhält.

Das Kalorimeter kann durch Zufuhr elektrischer Energie geeicht werden. Dabei muß die Wärmeverteilung in dem Kalorimeter der Energieverteilung durch Strahlenabsorption entsprechen. Durch Einbau von Heizdrähten in verschiedener Anordnung konnte diese Bedingung nicht erfüllt werden. Bei der im folgenden beschriebenen Dosimeterkonstruktion wird daher das gewebeäquivalente Material direkt als Heizwiderstand verwendet.

Unter Berücksichtigung der Absorptionsbedingungen sollte das Dosimeter so klein wie möglich sein und sich in den zur Verfügung stehenden Bestrahlungspositionen des Reaktors verwenden lassen. Die Dosimeterkonstruktion muß berücksichtigen, daß Änderungen der Umgebungstemperatur die Messung nicht beeinflussen.

In der vorliegenden Literatur zur Kalorimetrie der Energiedosis wurden zuerst die Möglichkeiten zur Bestimmung der Energieabsorption von γ-Strahlung und hochenergetischen Elektronen für Dosisleistungen in der Größenordnung von Krad/h beschrieben, bei denen als Meßmethoden differentielle Verfahren (2-4), die Messung von Wärmeleitung in Metallen (5), isotherme (6-7) und adiabatische Verfahren (8-13) angewandt wurden.

Messungen der Energieabsorption im gemischten Neutronen- und γ-Strahlenfeld wurde - den speziellen Meßbedingungen angepaßt - im allgemeinen bei Dosisleistungen in der Größenordnung Mrad/h nach dem adiabatischen (14 - 15), isothermen Meßprinzip (16 - 18) oder nur durch Messung der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung (19 - 20) durchgeführt.
Durch die Schwierigkeit, adiabatische Bedingungen über eine größere Meßzeit aufrechtzuerhalten, sind nur Kurzzeitmessungen mit großer Genauigkeit möglich (21 - 23). Die isothermen Verfahren besitzen bei Änderungen der Dosisleistung eine große Relaxationszeit und konnten deshalb nur bei konstanter Dosisleistung, das heißt bei Temperaturgleichgewicht zwischen Absorber und Umgebung, durchgeführt werden.

2 Grundlagen der kalorischen Dosimetrie

2.1 Energieabsorption von Strahlung in Materie

Durch Wechselwirkungsprozesse von ionisierender Strahlung mit den Atomen der Materie wird Strahlungsenergie auf die Materie übertragen.
Die pro Masseneinheit aufgenommene Energie wird als Energiedosis D bezeichnet, sie ist gegeben durch den Quotienten

$$(1) \qquad D = \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta W}{\Delta V}$$

wobei ΔW die Energie ist, die der Materie in einem Massenelement Δm bzw. einem Volumenelement $\Delta V = \Delta m/\rho$ (ρ = Materialdichte) durch Strahlung zugeführt wird.

Die Einheit der Energiedosis ist das rad. (1 rad = 100 erg $\cdot g^{-1}$ = $6.243 \cdot 10^{13}$ eV $\cdot g^{-1}$ = $2.389 \cdot 10^{-6}$ cal $\cdot g^{-1}$).
Die absorbierte Energie ΔW ist gleich der dem Kalorimeter zugeführten Wärmemenge ΔQ_s, sofern die gesamte absorbierte Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt wird. Berücksichtigt man die durch Energieaufnahme ausgelösten endothermen chemischen Reaktionen des bestrahlten Materials durch einen Faktor η, so gilt

$$(2) \qquad \Delta Q_s = \eta \cdot \Delta W$$

wobei η die Wärmeausbeute der aufgenommenen Strahlungsenergie ist.
Die durch Strahlenabsorption in einem Meßvolumen*) der Masse Δm und der spezifischen Wärme c auftretende Temperaturerhöhung ΔT ist dann

$$(3) \qquad \Delta Q_s = \eta \cdot \Delta m \cdot D = \Delta m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$(4) \qquad \Delta T = \eta \cdot \frac{D}{c}$$

*) Mit der Bezeichnung Meßvolumen oder Absorber wird ein räumlich von seiner Umgebung getrenntes Volumen bezeichnet, in dem die Energieabsorption gemessen werden soll.

Von SCHMIDT und SÄBEL (24) wird der Anteil der absorbierten Energie, der in gewebeähnlichem Plastikmaterial (nach SHONKA) nicht in Wärme umgewandelt wird, sondern chemische Prozesse auslöst, mit 3,6 % angegeben. Für die aus SHONKA-Plastik hergestellten Kalorimeter dieser Arbeit kann daher unabhängig von der Energie der einfallenden Strahlung $\eta = 0.96$ angenommen werden.

Bezeichnet $\overline{\Delta E}$ die mittlere Energieaufnahme des Materials pro Wechselwirkungsprozeß, so beträgt für ionisierende Teilchen der Energie E und der Flußdichte φ die spezifische Energieabsorption während der Bestrahlungszeit t

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = \Sigma \cdot \overline{\Delta E} \cdot \varphi \cdot t \tag{5}$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = \Sigma \cdot \frac{\overline{\Delta E}}{E} \cdot E \cdot \varphi \cdot t \tag{6}$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = \Sigma_a \cdot E \cdot \varphi \cdot t \tag{7}$$

wobei Σ der makroskopische Wirkungsquerschnitt und

$$\Sigma_a = \Sigma \cdot \frac{\overline{\Delta E}}{E} \tag{8}$$

der makorskopische Energieabsorptionsquerschnitt des Materials bei der Energie E ist.

Dementsprechend beträgt die Energiedosis

$$D = \frac{\Sigma_a}{\varrho} \cdot E \cdot \varphi \cdot t \tag{9}$$

Bei einem Energiespektrum der ionisierenden Teilchen ist entsprechend Formel (9) über den Energiebereich zu integrieren.

Bei zeitlich veränderlicher Flußdichte gilt:

$$D = \frac{\Sigma_a}{\varrho} \cdot E \cdot \int_0^t \varphi(t')\, dt' \tag{10}$$

Im folgenden werden für die einzelnen Strahlenarten die Wechselwirkungsprozesse diskutiert, die den makroskopischen Energieabsorptionsquerschnitt bestimmen.

γ-Strahlung

Bei γ-Strahlung erfolgt die Wechselwirkung durch den Photoeffekt (ph), den Comptoneffekt (c) und den Paarbildungseffekt (p). Die Summe der makroskopischen Wirkungsquerschnitte dieser Prozesse wird als Schwächungskoeffizient μ bezeichnet.

$$\mu = \Sigma_{ph} + \Sigma_c + \Sigma_p \tag{11}$$

Der totale makroskopische Wirkungsquerschnitt in Bezug auf die Energieabsorption wird als Energieabsorptionskoeffizient μ_a der γ-Strahlung bezeichnet und beträgt entsprechend Formel (6)

$$\mu_a = \Sigma_{ph} \cdot \frac{\overline{\Delta E}_{ph}}{E_\gamma} + \Sigma_c \cdot \frac{\overline{\Delta E}_c}{E_\gamma} + \Sigma_p \cdot \frac{\overline{\Delta E}_p}{E_\gamma} \tag{12}$$

wobei $E_\gamma = h \cdot \nu$ die Photonenenergie ist.

Bei einem zusammengesetzten Material ist über die Koeffizienten der einzelnen Atomarten entsprechend ihrem Anteil zu summieren.

Wird Gewebe mit Photonen bestrahlt, so beträgt die vom Material aufgenommene Energie entsprechend Formel (10)

$$D_\gamma = \frac{\mu_a}{\rho} E_\gamma \int_0^t \varphi(t')\, dt' \tag{13}$$

In Abb. (3) ist $\frac{\mu_a}{\rho}$ in Abhängigkeit von der Photonenenergie für gewebeäquivalentes Material dargestellt.

Bei einem Material niedriger Ordnungszahl (zum Beispiel Gewebe) ist im Energiebereich von 0.1 bis 10 MeV der Comptoneffekt vorwiegend maßgebend für die Übertragung der Strahlungsenergie auf das Material.

Neutronen

Neutronen reagieren mit den Atomkernen des bestrahlten Materials. Die Art der Wechselwirkungsprozesse ist von der Neutronenenergie und der atomaren Zusammensetzung des bestrahlten Materials abhängig.

Bei schnellen Neutronen erfolgt die Energieabsorption in einem Material niedriger Ordnungszahl, wie zum Beispiel Gewebe, praktisch ausschließlich durch elastische Streuung. Bei langsamen thermischen Neutronen überwiegt die Energieabsorption durch Einfang.

Da bei der elastischen Streuung schneller Neutronen

$$(14) \qquad \frac{\overline{\Delta E}}{E_n} = \frac{2M}{(M+1)^2}$$

wobei M das Verhältnis der Neutronenmasse m zu der des Atomkerns m ist, folgt für schnelle Neutronen der Energie E_n

$$(15) \qquad D_n = \frac{\Sigma}{\rho} \frac{2M}{(M+1)^2} \cdot E_n \int_0^t \varphi(t')\, dt'$$

wobei Σ der makroskopische elastische Streuquerschnitt des Materials für Neutronen der Energie E_n ist.

Bei gewebeäquivalentem Material ist über die einzelnen Atomarten entsprechend ihren Anteilen zu summieren.

2.2 Strahlungsgleichgewicht zwischen dem Meßvolumen und der Umgebung

Sowohl bei Photonen- wie auch bei Neutronenstrahlung erfolgt die Energieübertragung auf das Material ausschließlich durch die bei den Wechselwirkungsprozessen erzeugten ionisierenden Sekundärteilchen (Elektronen bei γ-Strahlung und Rückstoßkerne bei Streuung schneller Neutronen). Durch die bei Bestrahlung in einem Material entstehende Sekundärstrahlung kann ein Energieverlust oder -zuwachs durch Energieaustausch zwischen dem Meßvolumen und seiner Umgebung eintreten.

Um definierte Meßbedingungen bei der Bestimmung der Energiedosis eines bestrahlten Materials zu erreichen, ist es deshalb Voraussetzung, daß die Sekundärstrahlung im Maßvolumen im Strahlungsgleichgewicht mit der Sekundärstrahlung der Umgebung steht.
Strahlungsgleichgewicht zwischen dem Meßvolumen und der Umgebung besteht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Verhältnisse von Energieabsorptionsquerschnitt Σ_a zum Bremsvermögen $S(E) = -dE/dx$ für Absorber und Umgebung müssen gleich sein.

$$(16) \qquad \left(\frac{\Sigma_a}{S}\right)_M = \left(\frac{\Sigma_a}{S}\right)_U$$

2. Die Abmessungen des Meßvolumens müssen klein im Verhältnis zur Reichweite der Primärstrahlung sein.

3. Die Wandstärke der Umhüllung des Meßvolumens, mit der Strahlungsgleichgewicht hergestellt werden soll, muß größer als die Reichweite der Sekundärstrahlung sein.

Die 1. Bedingung ist stets erfüllt, wenn das Meßvolumen und das umgebende Material die gleich atomare Zusammensetzung haben. Der Richteffekt bei der Absorption hochenergetischer γ-Strahlung ist im vorliegenden Fall vernachlässigbar.

2.3 Abschirmung eines Meßvolumens durch die Umgebung

Die Abschirmung eines Meßvolumens durch die umgebenden Materialien führt zu einer Schwächung der ionisierenden Strahlung.

γ-Strahlung

Vernachlässigt man den Einfluß der in der Abschirmung des Meßvolumens gebildeten γ-Streustrahlung, so beträgt die Flußdichte im Meßvolumen

$$(17) \qquad \varphi = \varphi_0 \, e^{-\mu \cdot d}$$

wobei φ_0 die Flußdichte der einfallenden Photonen, d die Schichtdicke

und μ der Schwächungskoeffizient der das Meßvolumen umhüllenden Kalorimetermaterialien ist. In Abb. (1 a) ist der Dosisreduktionsfaktor φ / φ_o für Gewebe verschiedener Materialstärke in Abhängigkeit von der Photonenenergie dargestellt. (Werte μ/ρ nach BLIZARD in (25)).

Neutronen-Strahlung

Die Schwächung der primären Flußdichte φ_o schneller Neutronen kann angenähert durch eine Exponentialfunktion

$$\varphi = \varphi_o \cdot e^{-\Sigma_r \cdot d} \qquad (18)$$

beschrieben werden, wobei Σ_r der Beseitigungsquerschnitt ist.
Der sich durch Wechselwirkungsprozesse zwischen schnellen Reaktor-Neutronen und Gewebe ergebende Flußdichtereduktionsfaktor φ / φ_o ist in Abb. (1 b) in Abhängigkeit von der Materialstärke d aufgetragen, berechnet mit einem von NACHTIGALL (26) angegebenen Beseitigungsquerschnitt $\Sigma_r = 0.133$.

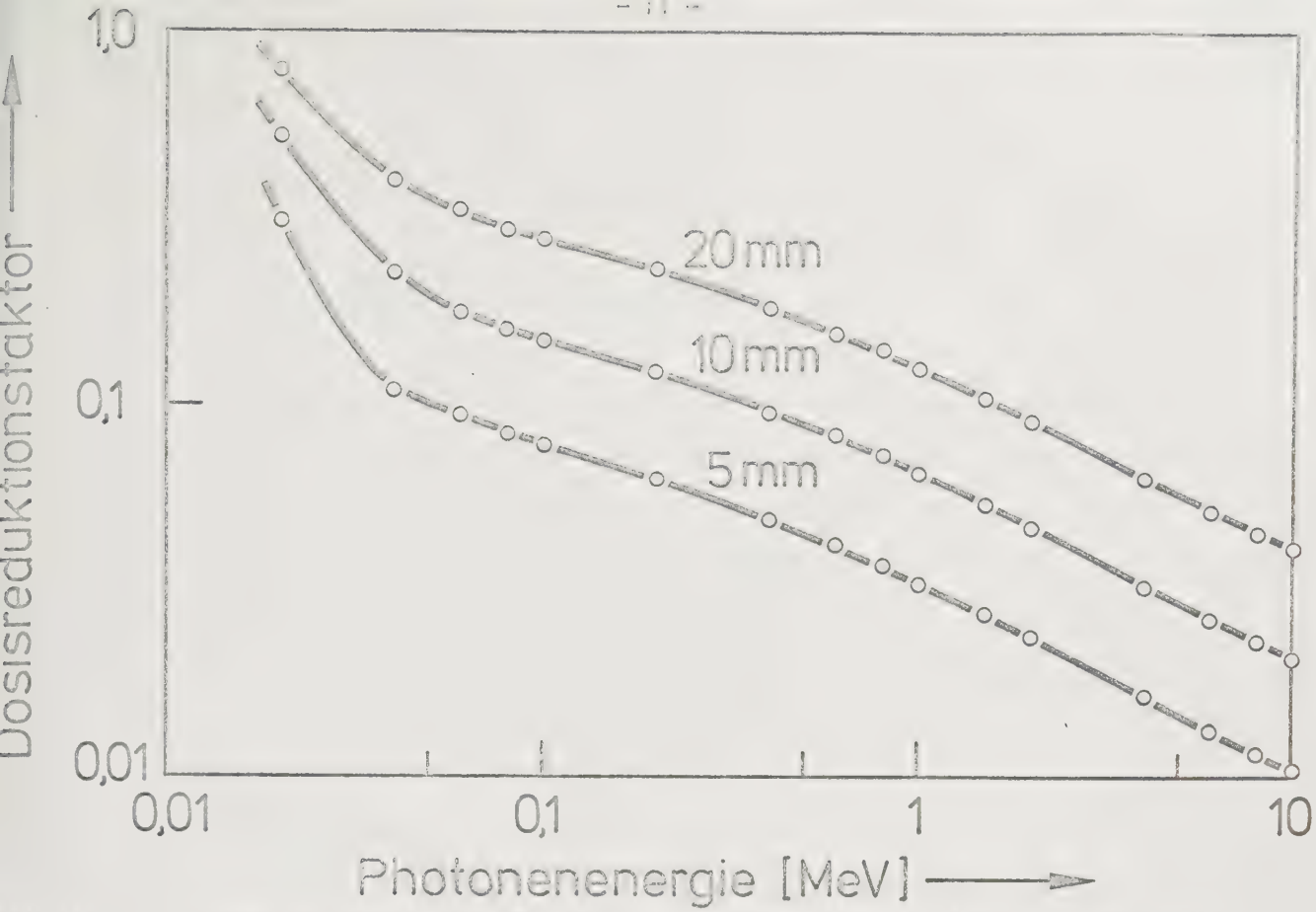
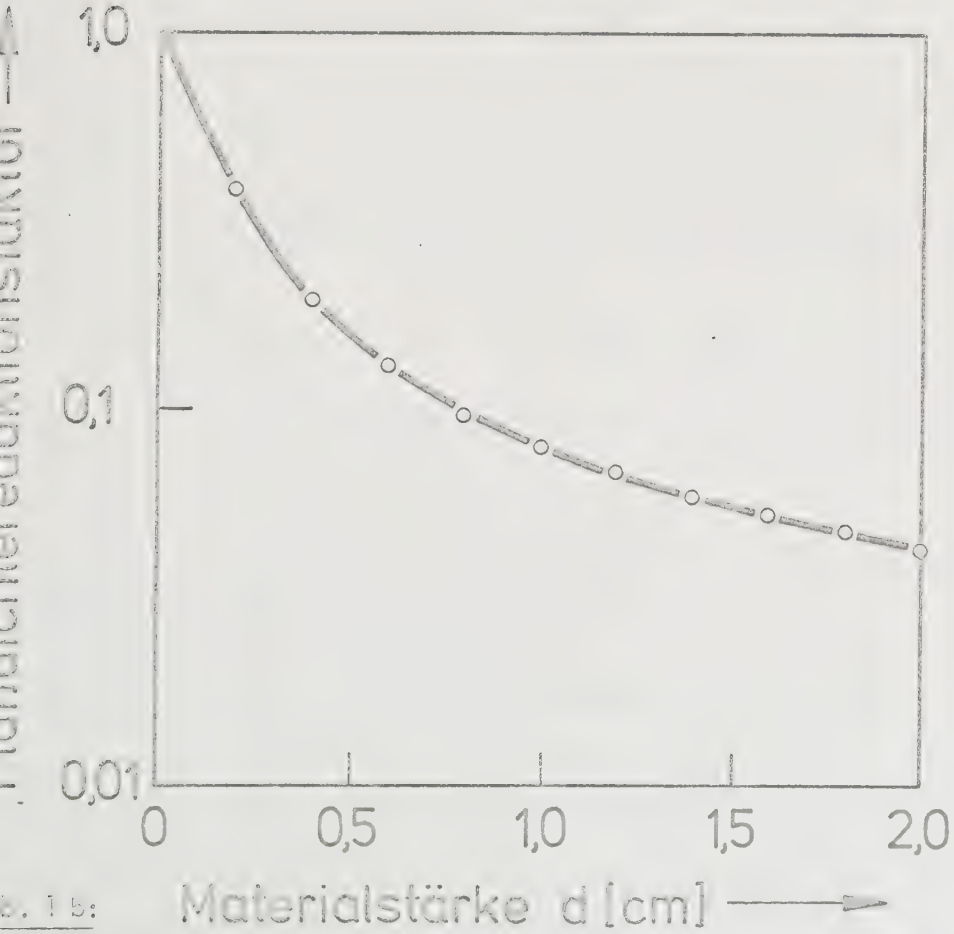


Abb. 1 a: Dosisreduktionsfaktor für Gewebe verschiedener Materialstärke in Abhängigkeit von der Photonenenergie



b. 1 b:

ußdichtereduktionsfaktor schneller Neutronen für Gewebe in Abhängigkeit von r Materialstärke

2.4 Kalorische Meßverfahren

2.41 Wärmeverluste eines Meßvolumens

Die von dem Meßvolumen aufgenommene Strahlungsenergie kann nur dann fehlerfrei nachgewiesen werden, wenn durch Wärmeisolation Energieverluste vermieden, kompensiert oder konstant gehalten werden.
Zwischen einem nicht-isolierten Meßvolumen und seiner Umgebung findet Wärmetransport durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung statt.
Dieser Energieaustausch wird in erster Linie durch die Geometrie des Meßvolumens und seiner Umgebung bestimmt.

Wärmeleitung

Zwischen zwei durch einen Luftspalt von einander getrennten Flächen der Größe A und den Temperaturen T bzw. T_o wird durch Zusammenstöße der Gasmoleküle in der Zeit t die Energie Q_v (der Index v bezeichnet den Wärmeverlust) transportiert. Es gilt

$$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = w_L \cdot (T - T_o) \cdot A \tag{19}$$

wobei für parallele Flächen mit dem Abstand d der Koeffizient der Wärmeleitung

$$w_L = k/d$$

ist. Die Wärmeleitfähigkeit für Luft kann aus der Beziehung

$$k \approx \varrho \cdot \overline{v} \cdot \lambda \cdot c_v$$

berechnet werden, wobei

ϱ = Dichte der Luft
$\overline{v}$ = mittlere Geschwindigkeit der Moleküle
λ = mittlere freie Weglänge der Moleküle
c_v = spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen.

Wird der Druck soweit reduziert, daß die mittlere freie Weglänge der Moleküle λ größer als der Abstand d der Flächen unterschiedlicher Temperatur ist, so erfolgt die Wärmeleitung nur noch durch direkte Stöße der verbleibenden Moleküle mit den Wandflächen. In diesem Fall ist bei dem Gasdruck p

(20) $$w_L = \alpha \cdot p$$

Von KENNARD (27) wurde der Koeffizient α für Wärmeleitung in Luft zwischen parallelen Flächen, für die $d \ll \lambda$, berechnet zu

(20 a) $$\alpha = 9.2 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{K Torr}$$

Wärmestrahlung

Den Energieverlust durch Wärmestrahlung beschreibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Ist s das Verhältnis der Strahlenemission eines vorgegebenen Strahlers zu der eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur und Oberfläche A, so gilt

(21) $$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = s \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

wenn T die absolute Temperatur in $^\circ$K und $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$ (W/cm^2 $^\circ$K^4) die Stefan-Boltzmann-Konstante ist. Für den Energietransport zwischen einem Meßvolumen der Temperatur T und seiner Umgebung der Temperatur T_o gilt die Beziehung

(22) $$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = \sigma \cdot F \cdot A \cdot (T^4 - T_o^4)$$

Von MC ADAMS (28) wird der Faktor F für ein allseitig umgebenes Meßvolumen angegeben:

(22 a) $$F = \frac{s}{1 + \frac{A}{A_o} \cdot \left(\frac{s}{s_o} - s\right)}$$

A bzw. A_o = Oberfläche des Meßvolumens bzw. der Umgebung

s bzw. s_o = Verhältnis der Strahlenemission des Meßvolumens bzw. der Umgebung zu der eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur

Für kleine Temperaturdifferenzen zwischen Meßvolumen und Umgebung ist

$$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = 4\sigma \cdot F \cdot A \cdot T_o^3 (T - T_o) \tag{23}$$

Der Energieverlust durch Wärmestrahlung kann entsprechend Formel (19) angegeben werden zu

$$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = w_s \cdot (T - T_o) \cdot A \tag{24}$$

wenn

$$w_s = 4\sigma \cdot F \cdot T_o^3$$

Die Summe der Energieverluste eines vollständig von seiner Umgebung getrennten Meßvolumens durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung ist nach Formel (19) und (24)

$$\frac{\Delta Q_v}{\Delta t} = A(w_s + w_L) \cdot (T - T_o) \tag{25}$$

$$w = w_s + w_L = 4\sigma \cdot F \cdot T_o^3 + \alpha \cdot p$$

Ein Meßvolumen ist dann ideal isoliert, wenn

$$w = w_s + w_L = 0 \tag{25 a}$$

was nur bei T = 0 möglich ist.

2.42 Das adiabatische Meßverfahren

Ein Meßvolumen befindet sich in einem adiabatischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, wenn die Wärmeverluste des Meßvolumens durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung klein gegenüber der Wärmezufuhr durch die "geleistete Arbeit" sind.

$$dA = \delta Q + d U$$

Für den adiabatischen Fall gilt: $\delta Q = 0$

Wärmeverluste des Meßvolumens lassen sich durch eine zweckmäßige Dosimeterkonstruktion reduzieren. Am besten geeignet ist ein Vakuumkalorimeter, in dem eine heizbare Wärmeisolation das Meßvolumen allseitig umgibt und dadurch eine Beeinflussung des Meßvolumens durch Änderungen der Außentemperatur verhindert. Durch Wärmestrahlung wird dem Meßvolumen von dem geheizten Wärmeisolator Energie zugeführt, die das Meßvolumen nicht durch die nach Außen führenden Zuleitungen verlieren kann, wenn die Drähte des Absorbers wärmeleitend mit dem Wärmeisolator verbunden sind. Durch diese Konstruktion stellt sich vor der Dosismessung annähernd Temperaturgleichheit zwischen Wärmeisolator und Absorber ein.

Der adiabatische Gleichgewichtszustand bleibt bei einer Erwärmung des Absorbers durch Energieabsorption oder bei der Eichung des Absorbers durch Heizen nur dann bestehen, wenn durch Heizen die Temperatur des Wärmeisolators um den gleichen Betrag erhöht wird. Die Schwierigkeit des adiabatischen Meßverfahrens besteht deshalb in der genauen Angleichung der Temperatur des Wärmeisolators an diejenige des Meßvolumens während der Bestrahlung.

Wird dem Meßvolumen die Energie ΔQ_s zugeführt, so ist eine vollständige Angleichung der Temperatur T_A des Meßvolumens an die Temperatur $T_{W\mathfrak{Z}}$ der umgebenden Wärmeisolation während der Bestrahlungszeit nicht möglich. In der Praxis bleibt eine kleine Temperaturdifferenz $T_A - T_{W\mathfrak{Z}}$ bestehen, die

durch die Genauigkeit der Nachheizung des Wärmeisolators nahezu konstant gehalten wird.

Unter dieser Voraussetzung beträgt die zeitliche Änderung der Wärmeenergie Q_A im Absorber bei Bestrahlung mit einer Dosisleistung $\dot{D} = dD/dt$

$$\frac{dQ_A}{dt} = \eta \cdot m \cdot \dot{D} - \frac{dQ_v}{dt} \tag{26}$$

Beschreibt Q_v den Wärmeverlust gemäß Formel (23), so gilt:

$$\frac{dQ_A}{dt} = \eta \cdot m \cdot \frac{dD}{dt} - w \cdot A \cdot (T_A - T_{W\mathfrak{F}}) \tag{26 a}$$

Eine Abschätzung (vgl. später in Abschnitt 4.5) zeigt, daß der 2. Term der Differentialgleichung, der bei den Messungen nahezu konstant bleibt und etwa 1 % beträgt, gegenüber dem 1. Term vernachlässigt werden kann. Da $dQ_A = m \cdot c \cdot dT$ ist, gilt für das aidabatische Kalorimeter

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\eta}{c} \cdot \dot{D} - \frac{w \cdot A}{m \cdot c} (T_A - T_{W\mathfrak{F}}) \tag{27}$$

Als Empfindlichkeit ε_A des adiabatischen Kalorimeters wird das Verhältnis der Temperaturänderung im Meßvolumen pro Zeiteinheit zu der Dosisleistung $\dot{D}$ definiert. Aus Formel (27) folgt somit

$$\varepsilon_A = \frac{dT/dt}{\dot{D}} = \frac{\eta}{c} - \frac{w \cdot A \cdot (T_A - T_{W\mathfrak{F}})}{m \cdot c \cdot \dot{D}} \quad \left[T_A - T_{WJ} = \text{const.}\right] \tag{28}$$

Der 2. Term in dieser Gleichung gibt die Verminderung der Empfindlichkeit durch Wärmeverluste an. Je kleiner das Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Absorbers, der Wärmeleitungskoeffizient w und die Temperaturdifferenz $T_A - T_{W\mathfrak{F}}$ ist, und je größer die Dosisleistung ist, desto kleiner ist dieses Korrekturglied der Empfindlichkeit.

2.43 Das quasi-adiabatische Meßverfahren

Ein zweites mögliches Meßverfahren besteht im Gegensatz zum adiabatischen Verfahren darin, die Temperatur des Wärmeisolators (T_{WJ}) während der Bestrahlung konstant zu halten und die Temperatur (T_A) des Meßvolumens zu registrieren. Bei diesem Verfahren, das im folgenden als quasi-adiabatisches Verfahren bezeichnet wird, ist somit T_A und ($T_A - T_{WJ}$) eine Funktion der Zeit t; bei Bestrahlungsbeginn (t = 0) ist $T_A = T_{WJ} = T_o$.

Für die zeitliche Änderung der Temperatur des Meßvolumens bei konstanter Dosisleistung $\dot{D}$ gilt unter der Voraussetzung, daß Wärmeverluste des Absorbers gemäß Formel (22) nur durch Strahlung eintreten

$$(29) \qquad \frac{dQ_A}{dt} = \eta \cdot m \cdot \dot{D} - \sigma \cdot F \cdot A \,(T_A^4 - T_{WJ}^4)$$

Die Lösung dieser Gleichung ergibt mit $T_{WJ} = T_o$

$$(30) \qquad 4\gamma^3 \beta^4 t = 2 \operatorname{arctg} \frac{(T_A - T_o)\gamma}{\gamma^2 + T_A T_o} - \ln \frac{T_A - \gamma}{T_A + \gamma} \cdot \frac{T_o + \gamma}{T_o - \gamma}$$

wenn

$$(30\,a) \qquad \gamma^4 = T_o^4 + \eta \cdot m \cdot \dot{D}/\sigma FA$$

$$(30\,b) \qquad \beta^4 = \sigma \cdot F \cdot A/m \cdot c$$

Die zeitabhängige Temperaturänderung des Absorbers ist nach Gleichung (30) unter Verwendung von Formel (30 a) und (30 b) zu berechnen. Der Faktor F A kann mit Formel (22 a) unter Berücksichtigung der Emissionseigenschaften der Oberfläche A des Meßvolumens angegeben werden.
Durch Variation des Faktors F A kann die berechnete Kurve der Messung der zeitabhängigen Temperaturänderung des quasi-adiabatischen Kalorimeters angepa

werden. In Abschnitt 4.4 kann dann gezeigt werden, daß sich aus der der Messung entsprechenden, berechneten Kurve ein sinnvoller Wert für die Emission s des Absorbermaterials ergibt.

Mit den zulässigen Annahmen, daß

$$T_A \approx T_o \quad \text{und} \quad \gamma = T_o + \frac{\eta \cdot m \cdot \dot{D}}{4 T_o^3 \sigma F A} \approx T_o$$

folgt mit $w = 4 \sigma F T_o^3$ aus Gleichung (30)

$$(31) \qquad T_A(t) = T_o + \frac{\eta \cdot m \cdot \dot{D}}{w A} \left(1 - e^{-\frac{wA}{mc} \cdot t}\right)$$

Danach beträgt die erreichte Endtemperatur ($t \to \infty$) im Meßvolumen

$$(31\,a) \qquad T_\infty = T_o \frac{\eta \cdot m \cdot \dot{D}}{w A}$$

Die differentielle Empfindlichkeit des quasi-adiabatischen Kalorimeters beträgt

$$(32) \qquad \varepsilon(t) = \frac{d(T_A - T_o)}{\dot{D} \, dt} = \frac{\eta}{c} e^{-\frac{wA}{mc} \cdot t}$$

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, die Dosisleistung mit diesem Verfahren zu bestimmen:

1. durch Messung des anfänglichen linearen Temperaturanstiegs im Meßvolumen, der durch die Beziehung

$$T(t) = T_o + \frac{\eta \cdot \dot{D}}{c} \cdot t \qquad \text{für} \qquad t \ll \frac{m \cdot c}{w \cdot A}$$

gegeben ist. Für diese Messung kann analog zum idealen adiabatischen Dosimeter (vgl. 2.42) als Empfindlichkeit ε_o die Anfangssteigung pro Einheit der Dosisleistung definiert werden, das heißt

$$(32\,a) \qquad \varepsilon_o = \frac{1}{\dot{D}} \left. \frac{d(\Delta T)}{dt} \right|_{t \to o} = \eta / c$$

2. durch Messung der Endtemperatur im Meßvolumen.
In diesem Fall ist es zweckmäßig, die Empfindlichkeit durch die im Endzustand erreichte Temperaturdifferenz zwischen Meßvolumen und Wärmeisolation pro Dosisleistungseinheit zu definieren, das heißt

$$\varepsilon_\infty = \frac{T_\infty - T_0}{\dot{D}} = \frac{m \cdot \eta}{w \cdot A} \qquad (32\,b)$$

Die Empfindlichkeit ist, umgekehrt wie beim adiabatischen Verfahren, proportional dem Verhältnis von Volumen zu Oberfläche des Meßvolumens. Je besser die Wärmeisolation ist, desto größer ist verständlicherweise die Empfindlichkeit.

2.44 Das isotherme Meßverfahren

Mit einem Vakuum-Kalorimeter der gleichen Konstruktion wie das in Abschnitt 2.42 beschriebene adiabatische Dosimeter kann die Dosis noch nach einem dritten, dem isothermen Meßverfahren bestimmt werden.
Dabei wird nicht nur die Wärmeisolation, sondern auch der Absorber geheizt und die gewählten Arbeitstemperaturen des Absorbers (T_A) und des Wärmeisolators ($T_{W\ddot{a}}$) (wobei $T_A > T_{W\ddot{a}}$), während der Messung durch Heizstromregelung konstant gehalten. Die durch die Bestrahlung vom Meßvolumen aufgenommene Wärmeleistung wird kompensiert durch eine gleichgroße Verminderung der elektrischen Heizleistung im Meßvolumen. Die Änderung $\Delta N_{el.}$ der elektrischen Heizleistung im Meßvolumen bei Bestrahlung ist daher ein Maß für die Dosisleistung $\Delta\dot{D}$ im Meßvolumen. Da das Dosimeter isotherm betrieben wird, bleiben die Wärmeverluste des Meßvolumens unverändert, und es ist daher $dQ_A/dt = 0$.
Im Gleichgewichtszustand gilt somit

$$\Delta N_{el.} = m \cdot \eta \cdot \Delta\dot{D} \qquad (33)$$

Unter der Voraussetzung, daß sich der elektrische Widerstand R des Absorbers unter dem Einfluß der Bestrahlung nicht ändert, folgt

$$\Delta N_{el.} = (i_o^2 - i^2) \cdot R = m \cdot \eta \cdot \dot{D} \qquad (33\,a)$$

wobei

i_o die Heizstromstärke vor Bestrahlung

i die durch Energieabsorption reduzierte Heizstromstärke.

Im Gegensatz zu dem adiabatischen Verfahren ist es bei diesem isothermen oder Kompensationsverfahren zweckmäßig, die Empfindlichkeit ε_i des Kalorimeters durch die Beziehung

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta N_{el.}/m}{\Delta D^{\cdot}} = \frac{R(i_o^2 - i^2)}{\Delta D^{\cdot}} = \eta \qquad (34)$$

zu definieren. Abgesehen von der Korrektur durch die Wärmeausbeute der aufgenommenen Strahlungsenergie ist ε_i gleich der Masse m des Absorbers. Aus einem Vergleich der gemessenen Empfindlichkeit ε_i mit der Masse m des Absorbers kann somit auch die Wärmeausbeute des Absorbermaterials bestimmt werden.

3 Dosimeterkonstruktion, Elektronik und Meßverfahren

3.1 Bauelemente des Dosimeters

Die im folgenden beschriebene Dosimeterkonstruktion ist einfach im Aufbau und ermöglicht bei der Herstellung Reproduzierbarkeit der Dosimetereigenschaften. Das Vakuumkalorimeter besteht aus drei heizbaren Bauelementen:

1. dem eigentlichen Absorber, in dem die absorbierte Dosis kalorimetrisch bestimmt wird,
2. dem Wärmeisolator, der den Absorber allseitig umgibt,
3. der Dosimeter-Kapsel, in die die Teile 1) und 2) vakuumdicht eingeschlossen sind.

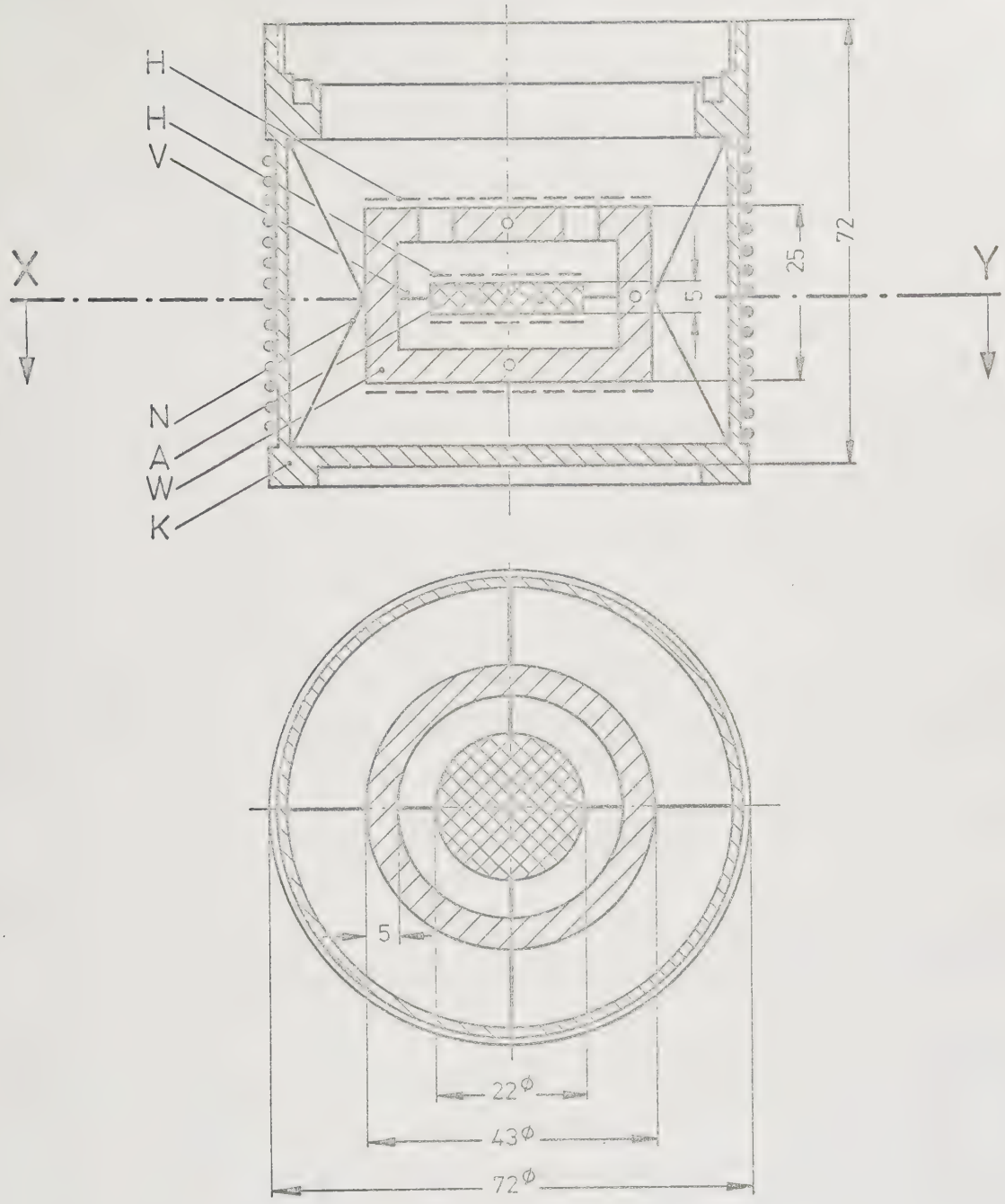
Die Anordnung der Bauelemente zeigt Abb. 2.

Wärmeverluste des Absorbers werden reduziert durch einen Vakuumspalt, der den Absorber von dem umgebenden Wärmeisolator trennt, durch Aufhängung des Absorbers (und Wärmeisolators) an Nylonfäden in der Dosimeter-Kapsel und durch Verwendung von dünnen Anschlußdrähten für Temperaturfühler und Heizung.

Um die in 2.2 gestellten Bedingungen des Strahlungsgleichgewichts zwischen dem Meßvolumen und der Umgebung zu erfüllen, werden der Absorber und der Wärmeisolator aus dem gleichen Material hergestellt. Die Abmessungen für den Wärmeisolator und die Dosimeter-Kapsel sind so gewählt, daß einerseits die Schwächung der Primärstrahlung klein bleibt, andererseits das Volumen des Absorbers möglichst groß ist, damit die Materialien für Temperaturfühler, Anschlußdrähte etc. einen vernachlässigbar kleinen Anteil am Gesamtvolumen des Absorbers ausmachen.

Der zylinderförmige Absorber hat bei einem Ø von 22 mm eine Höhe von 5 mm (Oberfläche = 11 cm^2).

Der Wärmeisolator hat bei einem Ø von 43 mm eine Höhe von 25 mm. Die Aufgaben des Wärmeisolators sind es, die Wärmeverluste des Absorbers zu



Schnitt X-Y

A - Absorber, V - Vakuumspalt, W - Wärmeisolator
K - Dosimeterkapsel mit Außenheizung,
H - Heizelektroden, N - Nylon-Aufhängung,
• Meß-Thermistor, ○ Regel-Thermistoren

Abb. 2: Aufbau des Dosimeters

reduzieren und die Bedingungen des Strahlungsgleichgewichts zwischen Absorber und Wärmeisolator zu erfüllen. Der Wärmeisolator umgibt den Absorber allseitig mit einer Wandstärke von 5 mm. Diese Wandstärke gewährleistet Strahlungsgleichgewicht der Sekundärstrahlung bis zu einer Photonenenergie von 2 MeV. Die mittlere Photonenenergie im Strahlenfeld des Reaktors liegt zwischen 1 und 2 MeV.

Eine Abschätzung der Strahlenschwächung durch den Wärmeisolator gemäß den Formeln (17) und (18) und dargestellt in den Abb. (1 a) und (1 b) zeigt, daß die Schwächung bei Photonenenergien von 200 keV etwa 5 % und bei Co-60-γ-Strahlung etwa 2 % beträgt, für Neutronen liegt die Schwächung durch eine Wandung von 5 mm bei 5 %.
Da sich die Bauelemente des Dosimeters durch Energieabsorption von Strahlung entsprechend ihren Absorptionseigenschaften und ihrer Lokalisation im Strahlenfeld unterschiedlich erwärmen, muß das verwendete Material eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzen, die gewährleistet, daß sich Temperaturunterschiede schnell ausgleichen können.
Um zur Eichung des Absorbers eine der Energieabsorption entsprechende Erwärmung zu erhalten, wird das Material des Absorbers direkt als Heizwiderstand verwendet.
Die heizbare Dosimeterkapsel bildet gleichzeitig das Vakuumgefäß des Kalorimeters, sie stellt die zweite wärmeisolierende Hülle des Absorbers dar.
Mit Ausnahme des Verschlußdeckels besteht die Dosimeterkapsel aus eloxiertem Aluminium. Die Heizwicklung aus Aluminiumdraht ist zusammen mit dem Regelthermistor in die Zylinderwand eingelassen. Im Stahldeckel mit Dichtungsschliff sind die glasisolierten Drahtdurchführungen und der Absaugstutzen eingebaut.

Die Dosimeterkapsel hat eine Wandstärke von 2 mm. Sie wurde so dünnwandig gehalten, um zu verhindern, daß das Strahlenfeld weder geschwächt noch durch Photonen, die durch n,γ-Prozesse in Aluminium und Eisen entstehen, verändert wird.

Die Dosimeterkapsel ist mit ihren Außenabmessungen (Ø 72 mm, Höhe 72 mm) den Bestrahlungspositionen im Reaktor BER des Hahn-Meitner-Instituts angepaßt.
Die kalorischen Messungen wurden bei einem Druck von $p < 1 \cdot 10^{-5}$ Torr durchgeführt.

3.11 Herstellung des Absorbers und des Wärmeisolators aus gewebeäquivalentem Material

Von der INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU) (29) wird für weiches Muskelgewebe folgende Zusammensetzung in Gewichtsprozenten angegeben:

C = 12,3 %	H = 10,2 %	0 = 72,9 %	N = 3,5 %
Na = 0,08 %	Mg = 0,02 %	P = 0,2 %	S = 0,5 %
K = 0,3 %	Ca = 0,007 %		

In Anlehnung an diese Angaben wird von SHONKA, ROSE und FAILLA (1) ein muskelgewebeäquivalentes Material beschrieben, das sich zur Untersuchung von Wechselwirkungsprozessen zwischen Photonen und Neutronen mit Gewebe eignet. Dieses Material setzt sich aus folgenden Gewichtsprozenten zusammen:

C = 76,2 %	H = 10,2 %	0 = 5,2 %	N = 3,5 %
F = 1,9 %	Si = 1,0 %	Ca = 2,1 %	

Es läßt sich durch Mischen von Polyaethylen, Polyamid, Graphit, Siliziumdioxyd und Calciumfluorid herstellen. Dieses gewebeäquivalente Material stimmt in den wichtigsten Eigenschaften mit dem ICRU-Gewebe überein:

1. Der Wasserstoff- und Stickstoffanteil ist gleich.
2. Die mittlere Elektronendichte und damit der Compton-Streuquerschnitt entsprechen einander.

3. Die Zusammensetzung der Mischung wurde so gewählt, daß bei $E_\gamma = 30$ keV die Mischung und das ICRU-Gewebe den gleichen Wirkungsquerschnitt für die Photoabsorption haben (vgl. Abb. 3).
4. Siliziumdioxyd und Calciumfluorid kompensieren den reduzierten Sauerstoffanteil.

Aus diesem von SHONKA beschriebenen gewebeäquivalenten Material wurden der Absorber und der Wärmeisolator hergestellt. Der Graphitzusatz der Mischung wurde jedoch reduziert, um eine geringere elektrische Leitfähigkeit zu erhalten und dadurch Absorber und Wärmeisolator direkt als Heizkörper verwenden zu können.
In Abb. (3) ist der Massenenergieabsorptionskoeffizient für Muskelgewebe, muskelgewebeäquivalentes Material nach SHONKA und für die zur Herstellung von Absorber und Wärmeisolator im Kohlenstoffanteil reduzierte Mischung dargestellt. *)
Das gewebeäquivalente Material der hier verwendeten Dosimeter hat die Zusammensetzung

C = 69,7 % H = 10,2 % O = 5,2 % N = 3,5 %
F = 1,9 % S = 1,0 % Ca = 2,1 %

der eine Mischung von
55,7 % Polyaethylen
30,2 % Polyamid
7,5 % Graphit
2,35 % Siliziumdioxyd
4,25 % Calciumfluorid entspricht.

In der Tabelle (1) sind die zur Herstellung des gewebeäquivalenten Materials verwendeten Pulver und ihre Korngrößen zusammengestellt.

---

*) Berechnet mit den von ROCKWELL (30) angegebenen Massenenergieabsorptionskoeffizienten der verwendeten Elemente

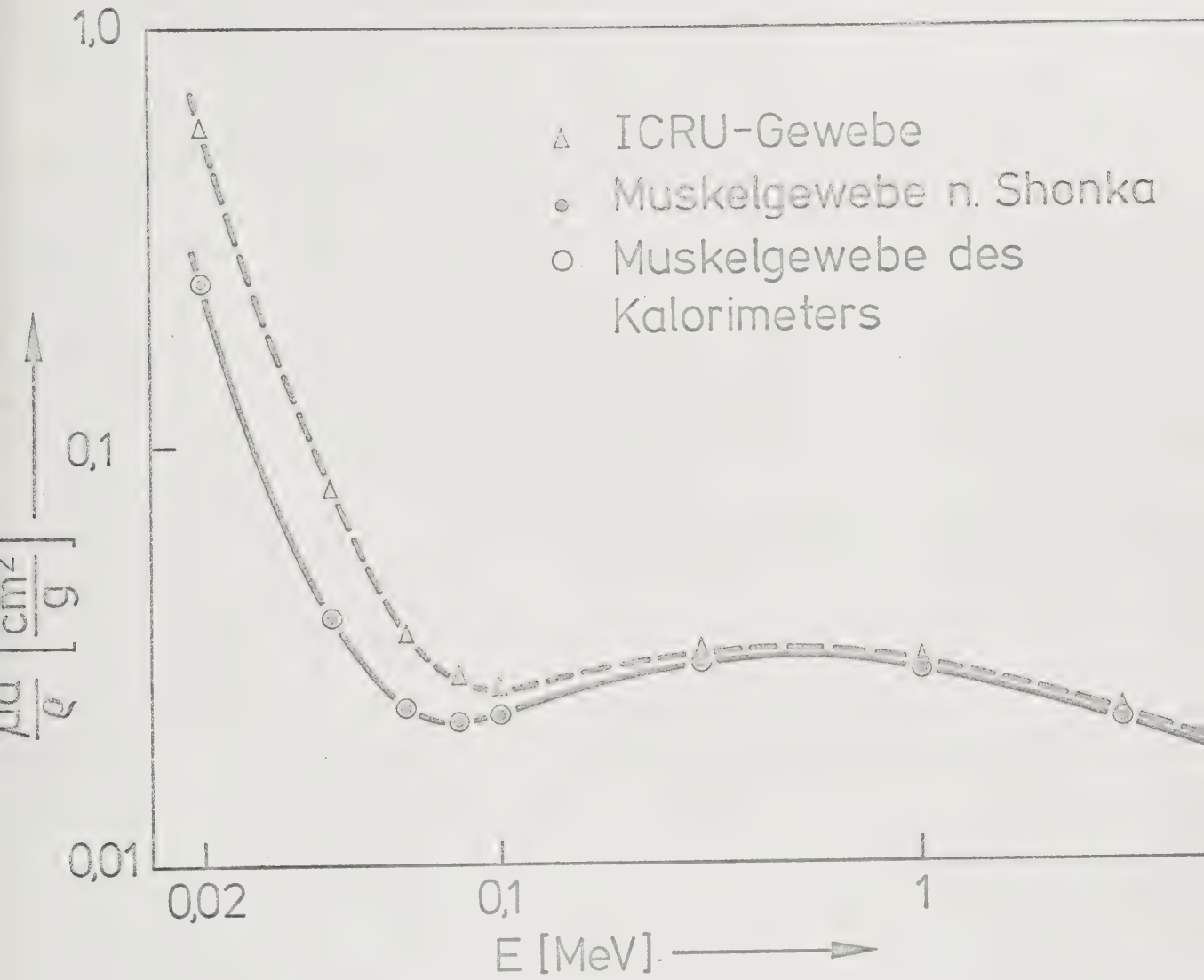


Abb. 3: Massen-Energieabsorptionskoeffizient in Abhängigkeit von der Photonenenergie in Gewebe [ICRU] und muskelgewebeäquivalentem Material

Tabelle 1: Verwendete Substanzen zur Herstellung gewebeäquivalenten Materials

Handelsname	Hersteller	Chem. Bezeichnung	Formel	Mittlere Korngrößen $[m \cdot 10^{-6}]$
Grisamid	Messer Griesheim	6,6 Polyamid	$C_6H_{11}NO_n$	45 - 85
Methacrylsäureamid			C_4H_7NO	40 - 80
Ultramid A	BASF	6,6 Polyamid	$C_6H_{11}NO_n$	115 - 215
Nylasint	Polypenco	6,6 Polyamid	$C_6H_{11}NO_n$	5 - 35
Hostalen	Hoechst	Polyaethylen	$C_2H_{4\,n}$	140 - 180
Flußspat	Merck	Ca-Fluorid	CaF_2	5 - 20
Quarzsand	Merck	Si-dioxyd	SiO_2	10 - 45
Graphit	Merck	Graphit	C	3 - 25

Die Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften des Materials, abhängig von der gleichmäßigen Graphitverteilung im Pulver, ist von der Durchführung des Mischverfahrens und der Art des verwendeten Polyamids abhängig.

Die Untersuchung zahlreicher Mischmethoden zeigte, daß sich eine homogene Graphitverteilung dann ergibt, wenn vor dem Mischen aller Pulverteile Graphit mit Polyamid verrieben wird (Vgl. Abb. 4). Nach gutem Mischen werden aus dem Pulver bei einem Druck von 50 kp/mm^2 zylinderförmige Bauelemente zur Verwendung als Absorber und Wärmeisolator hergestellt (vgl. Abb. 5). Der hohe Preßdruck garantiert durch Zusammenfließen der Kunststoffe Reproduzierbarkeit der bei der Bearbeitung wichtigen mechanischen Eigenschaften. Durch den hohen Preßdruck bildet sich allseitig auf der Oberfläche der Preßteile eine etwa 0,1 mm starke Schicht größerer elektrischer Leitfähigkeit (vgl. Abb. 6). Erst nach Abschleifen dieser Schicht besitzen die Preßteile eine homogene elektrische Leitfähigkeit. Nach Anbringen der Bohrungen für die Thermistoren wird das Gewicht des Absorbers bestimmt.
Die mit einer dünnen Leitsilberschicht überzogenen Zylinderdeckelflächen sind die Elektroden zur Zuführung des Heizstromes.

Der Wärmeisolator wird aus zwei zylinderförmigen Preßteilen hergestellt, die auf die in Abb. 2 angegebenen Maße ausgedreht werden. Die beiden Hälften des Wärmeisolators werden nach dem Einhängen des Absorbers mit Leitsilber und Kunstharz zusammengeklebt. Durchgehende Bohrungen in einer Deckelfläche des Wärmeisolators ermöglichen das Evakuieren des Vakuumspaltes zwischen Absorber und Wärmeisolator. Wie beim Absorber sind auch die Zylinderdeckelflächen des Wärmeisolators die Elektroden der Heizung.

Es wurden insgesamt 23 verschiedene kalorische Dosimetertypen aus gewebeäquivalentem Material unter Verwendung verschiedener Polyamide und veränderter Thermistorlokalisationen hergestellt. Die elektrischen Materialeigenschaften waren am besten reproduzierbar bei Verwendung von feinkörnigem

Abb. 4: Durch Verreiben mit Graphit überzogenes Polyamid

Abb. 5: Gewebeäquivalentes Material nach der Pressung

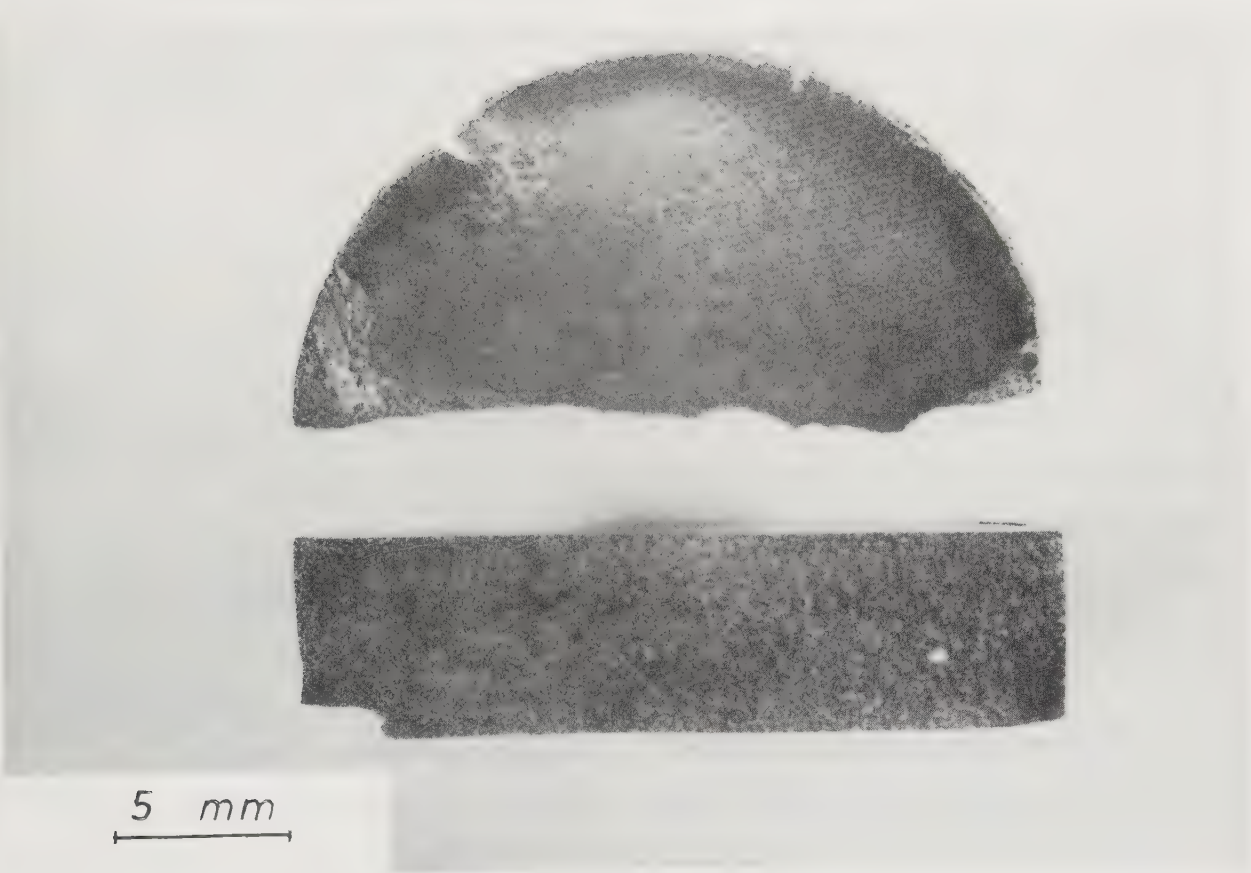


Abb. 6: Nicht-bearbeitete Oberfläche und Bruchfläche des Absorbers (Polyamidfraktion : Nylasint) - Maßstab 5 : 1

Nylasint als Polyamidfraktion. Bei 15 Dosimetertypen wurde Grisamid als Polyamid verwendet. Trotz guter mechanischer Eigenschaften dieser Mischung änderte sich der elektrische Widerstand durch Materialquellung, so daß der Absorberwiderstand vor jeder Messung bestimmt werden mußte. Ungeeignet zum Bau von gewebeäquivalenten Dosimetern ist Methacrylsäureamid als Polyamid. Durch Verdampfen des Polyamids kommt es zu einer Graphitanreicherung auf der Oberfläche des gewebeäquivalenten Materials und damit zu einem Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit.

3.12 Verwendung von Thermistoren zur Temperaturmessung und Temperaturregelung

Thermistoren sind in der Form der Zwerg-NTC-Widerstände wegen ihrer kleinen Abmessungen und ihrer großen Temperaturempfindlichkeit zur Temperaturmessung und -regelung in Absorber, Wärmeisolator und Dosimeterkapsel am besten geeignet.
Damit der Einfluß von Zuleitungs- und Kontaktwiderständen vernachlässigbar klein wird, wurden hochohmige Widerstände (100 KΩ) verwendet, deren Widerstandscharakteristik Abb. (7) zeigt. Für kleine Meßbereiche kann Linearität zwischen Widerstand und Temperatur angenommen werden.

$$R(T + \Delta T) = R(T) + r \cdot \Delta T \tag{35}$$

Die Thermistoren haben einen negativen Temperaturkoeffizienten von $r \approx -4\ \%\ {}^{\circ}C^{-1}$. Die Zwerg-NTC-Widerstände sind sorgfältig gealtert, so daß nur noch mit kleinen Änderungen ihres Kaltwiderstandes (Widerstandswert bei 25 °C) zu rechnen ist, es tritt keine Hysterese auf.

Verwendet wurden nicht-isolierte Zwerg-NTC-Widerstände.*) Die Abmessungen der Widerstände und die Anordnung der Zuleitungen sind in Abb. (8) dargestellt.

---

*) Hersteller: Valvo, Hamburg

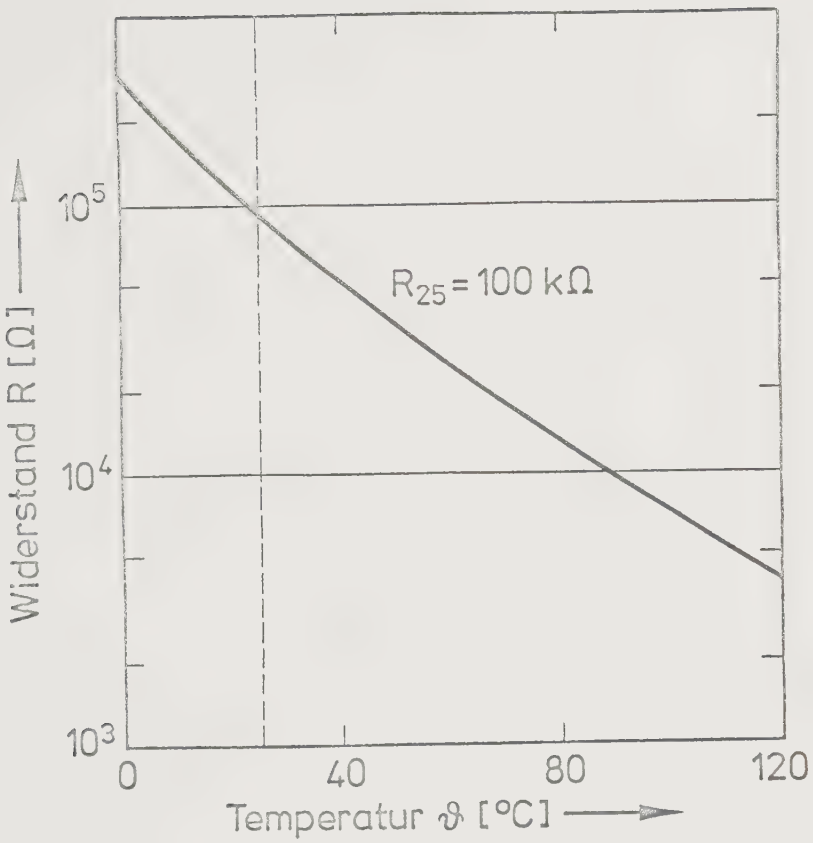


Abb. 7: Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur

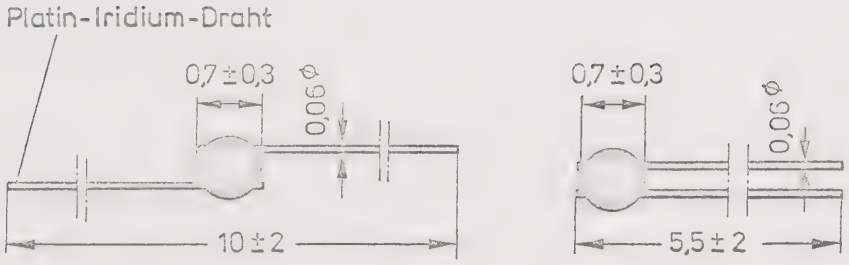


Abb. 8: Abmessungen der verwendeten Zwerg-NTC-Widerstände

Nach Isolation der Widerstände und Zuleitungen mit Araldit-Kunstharz erwies sich die zweite Bauform bei den kleinsten Abmessungen und großer Bruchfestigkeit für den Einbau in das Kalorimeter am besten geeignet.
Die große Exemplarstreuung der Thermistoren bezüglich des Kaltwiderstandes, des Temperaturkoeffizienten und die Nichtlinearität der Kennlinien machte die Aufnahme der Temperatur-Widerstandscharakteristik der NTC-Widerstände für jedes Exemplar erforderlich. Sie wurden in einem Thermostaten für den Temperaturbereich von 20 °C - 40 °C geeicht. Als Meßbrücke wurde der in 3.2 beschriebene Temperaturmeßkreis verwendet. Asymmetrien der Meßbrücke wurden durch Vergleich mit geeichten Festwiderständen ermittelt und die Meßwerte korrigiert.

Die Abmessungen der Zwerg-NTC-Widerstände sind so klein, daß das Strahlenfeld durch den Einbau von Thermistoren nicht verändert wird, außerdem ist ihre Masse im Vergleich zur Masse des gewebeäquivalenten Materials vernachlässigbar klein. *) Grundsätzlich könnte sich in den Thermistoren eine andere Gleichgewichtstemperatur als in dem umgebenden Material, dessen Temperatur bestimmt werden soll, einstellen.
Meßfehler durch diesen Effekt können vernachlässigt werden, weil

1. die Araldit-Isolation der Thermistoren einen mit dem umgebenden Material vergleichbaren gemittelten Wert für die Energieabsorption in dem Strahlungsfeld hat,
2. die Thermistoren und ihre Anschlußdrähte allseitig durch eine wärmeleitende Araldit-Graphitschicht fest mit dem gewebeäquivalenten Material verbunden sind, wodurch ein guter Wärmeausgleich erreicht wird, und
3. die verwendeten Zwerg-NTC-Widerstände eine minimale Wärmekapazität haben.

---

*) Gewebeäquivalenter Absorber ≈ 2 g,
Thermistoren, Drähte, Leitsilber ≈ 2 - 3 mg.

Um eine durch Strahlung bedingte Änderung der elektrischen Eigenschaften der verwendeten Thermistoren auszuschließen, wurden diese vor dem Einbau untersucht. Bei bestmöglicher Wärmeisolation in einem Vakuumgefäß, wurde die Widerstandsänderung von 100 KΩ-Zwerg-NTC-Widerständen in einem γ-Strahlenfeld konstanter Dosisleistung gemessen, in Abb. (9) ist die daraus berechnete Erwärmung der Thermistoren dargestellt. Es traten weder sprunghafte Widerstandsänderungen zum Bestrahlungsbeginn und -ende noch dosisabhängige Änderungen der elektrischen Eigenschaften auf. Die gemessene Erwärmung entspricht der berechneten materialabhängigen Energieabsorption. Hieraus wurde geschlossen, daß die elektrischen Eigenschaften bei Photonen-Bestrahlung unverändert bleiben.

Neutronen werden in allen zur Temperaturanzeige geeigneten Materialien wie Thermistoren, Thermoelementen und Widerstandsdrähten die Materialstruktur und damit die elektrischen Eigenschaften ändern. Die Strahlenresistenz der Thermistoren bei Neutronen-Strahlung wurde durch absolute Messungen der Temperatur-Widerstandscharakteristik vor und nach der Bestrahlung geprüft.
Bis zu einer Fluenz von $\leq 1 \cdot 10^{17}$ Neutronen/cm^2 bleiben die elektrischen Eigenschaften der verwendeten Thermistoren unverändert erhalten. Bei einer Neutronen-Fluenz $> 10^{17}$ n/cm^2 ist eine Änderung der Widerstandscharakteristi durch Vergrößerung des elektrischen Widerstandes nachweisbar, die in dem in Betracht kommenden Temperaturintervall von 30° - 40° C linear ist. Bedingt durch die Toleranzen der Thermistoren in Gewicht und Kaltwiderstandswert ist die irreversible Strahlenschädigung dem Betrage nach unterschiedlich, wie die in Abb. (10) dargestellten Widerstandsmessungen bei vier bestrahlten Thermistoren zeigen. Eine kontinuierliche Messung während der Bestrahlung ist durch die bei Energieabsorption eintretende Erwärmung nicht möglich. Durch Nacheichen der Thermistoren ist ihre Verwendung zur Heizstromregelung bei isothermen Messungen auch bei einer Neutronen-Fluenz $> 1 \cdot 10^{17}$ Neutronen/cm^2 möglich, die Lebensdauer der Meßsonde wird hierdurch verlängert.

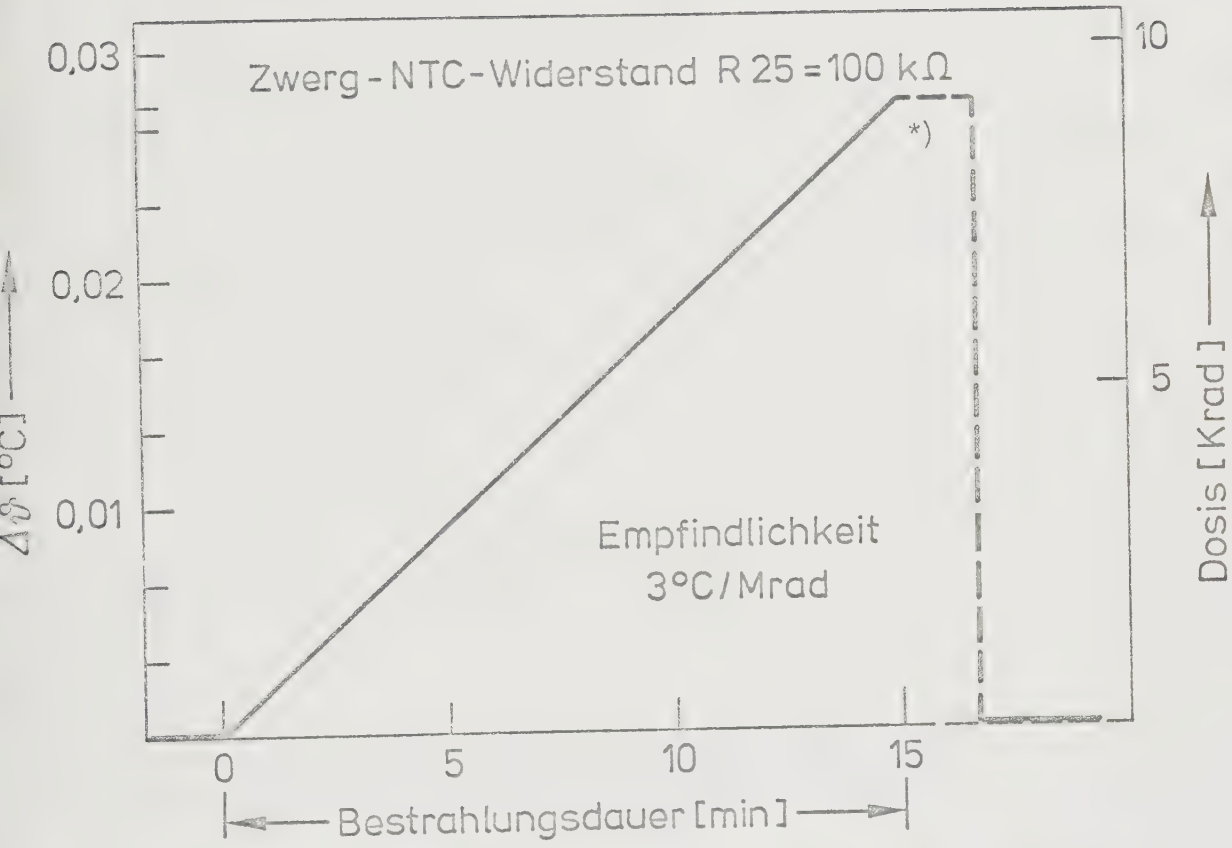


Abb. 9: Erwärmung eines Thermistors ohne Umhüllung bei konstanter γ-Dosisleistung

*) Nach Bestrahlung wird durch Wärmeabgabe, zeitlich abhängig von der Güte der Würmeisolation, der vor der Bestrahlung bestehende Widerstandswert erreicht.

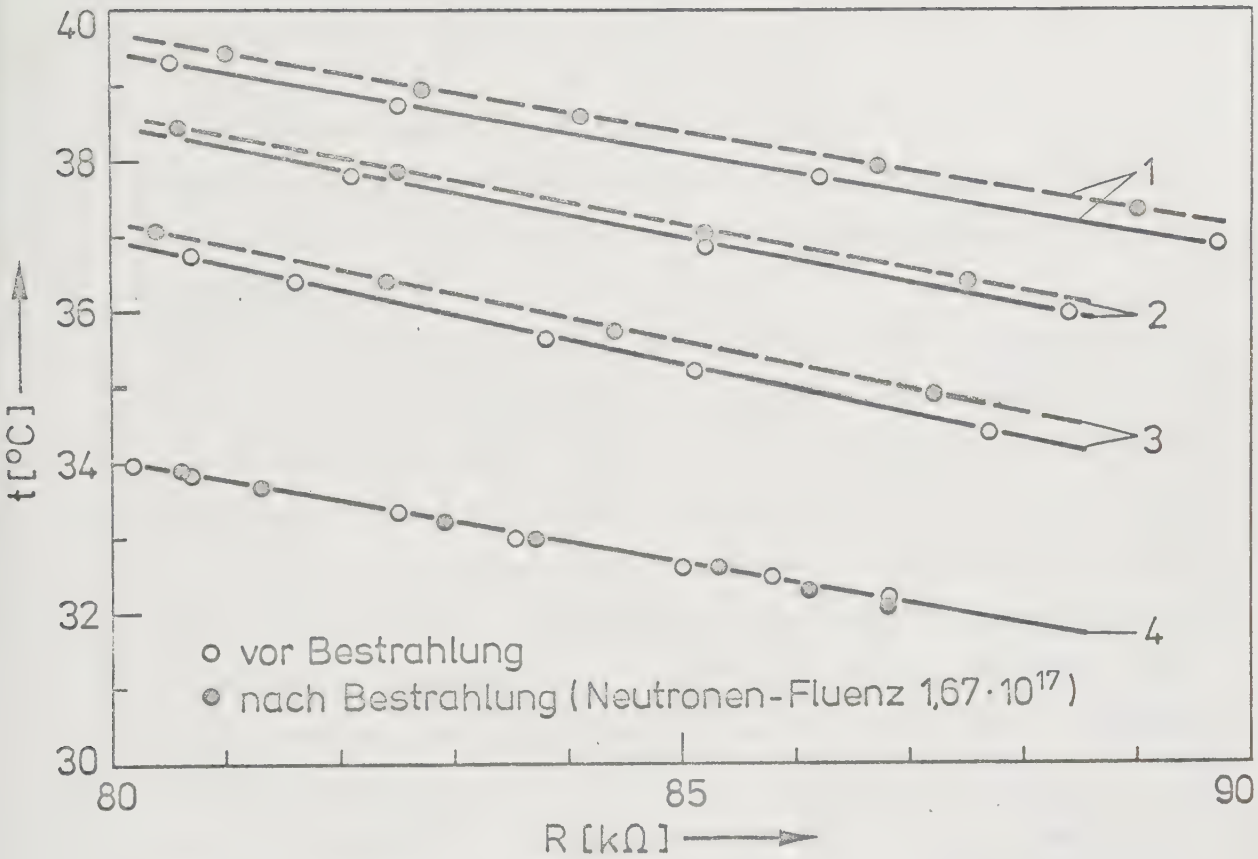


Abb. 10
Änderung der Widerstandscharakteristik von Thermistoren im gemischten Strahlungsfeld.

3.2 Elektronik zur Temperaturmessung und Heizstromregelung in Absorber, Wärmeisolator und Dosimeterkapsel

Die Temperaturmessung und Heizstromregelung in dem Absorber, Wärmeisolator und in der Dosimeterkapsel wird durch Messung der temperaturbedingten Widerstandsänderung von Thermistoren in hochohmigen Wheatstone-Brücken ausgeführt.

Das Prinzip der verwendeten Heizstromregelung, der die Temperaturmessung mit Thermistoren zugrunde liegt, ist in Abb. (11 a) schematisch dargestellt. Durch Verwendung geeichter Regelthermistoren ist die gewünschte Arbeitstemperatur der Heizung als bestimmter Soll-Wert, das heißt als variabler Widerstandswert, auf der Brücke einstellbar. Abweichungen zwischen diesem Soll-Wert und dem durch den Widerstandswert des Thermistors gegebenen Ist-Wert verstimmen ohne Beachtung des Vorzeichens die Wheatstone-Brücke. Den Differenzen zwischen dem Ist- und dem Soll-Wert entspricht die Brückenausgangsspannung Δu_B, die ein Verstärker um den Faktor V verstärkt. Durch die Heizung als Stellgröße wird der Ist-Wert des Thermistors so lange korregiert, bis Ist- und Soll-Wert der Temperatur gleich sind. Neben der Heizungsspannung Δu_H als Stellgröße beeinflussen die durch Energieabsorption eintretende Erwärmung und der Wärmeverlust als Störgrößen den Ist-Wert der Regelthermistoren. Der Ist-Wert kann dem Soll-Wert nur dann in einem begrenzten Temperaturintervall entsprechen, wenn die Verstärkung V groß genug ist, um durch eine geeignete Stellgröße den Ist-Wert dem Soll-Wert anzupassen.

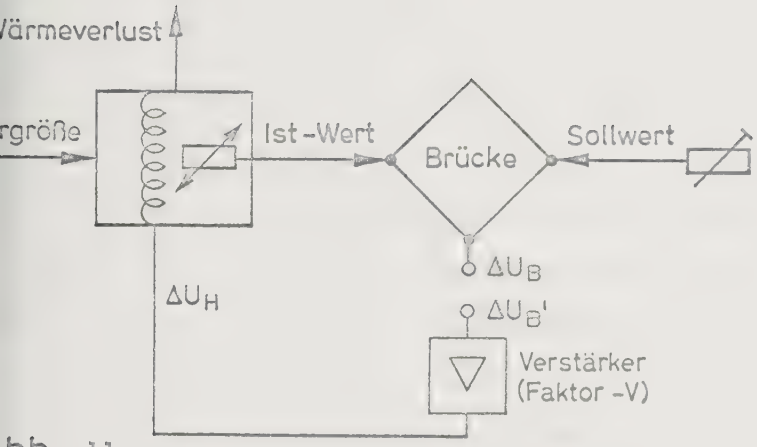
Die Temperaturänderung ΔT des geheizten Systems ist proportional der Änderung der Heizleistung

$$(T + \Delta T) \sim (N + \Delta N) = \frac{(U_H + \Delta U_H)^2}{R_H} \tag{36}$$

(R_H = Heizungswiderstand)

und für $\Delta U_H \ll U_H$ auch proportional der Änderung der Heizungsspannung ΔU_H

$$\Delta N \approx \frac{2\, U_H \cdot \Delta U_H}{R_H} \tag{36 a}$$



bb. 11 a
rinzip der Heizstromregelung

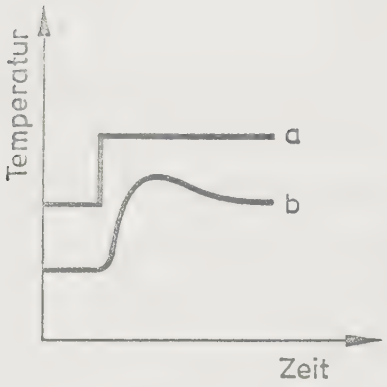


Abb. 11 b
Änderung von Soll-Wert a
und Ist-Wert b

Der Temperaturänderung ΔT des geheizten Systems ist außerdem proportional:

1. die Änderung der zugeführten oder abgeführten Wärme ΔW und
2. die Änderung der Brückenspannung ΔU_B (im benutzten Arbeitsbereich).

Die Temperaturänderung infolge der Änderung der Heizleistung und der Änderung der zugeführten oder abgeführten Wärme kann man superponieren und auf die Änderung der Brückenspannung beziehen

$$\Delta T \sim \Delta U_B = K \cdot \Delta U_H + \Delta W \tag{37}$$

wobei K die durch Messungen bestimmte Proportionalitätskonstante für ΔU_H und C die Proportionalitätskonstante für ΔW ist. Für den in Abb. (11 a) dargestellten offenen Regelkreis gilt die Beziehung

$$\Delta U_H = - V \cdot \Delta U_B' \tag{38}$$

Für den geschlossenen Regelkreis, in dem $\Delta U_B = \Delta U_B'$ ist, folgt aus Formel (37) und (38)

$$\Delta W = (V \cdot K + 1) \cdot \Delta U_B \tag{39}$$

Ist die Verstärkung V sehr groß, so kann bei einer gegebenen endlichen Änderung der Wärmezufuhr oder -abfuhr ΔW die Änderung der Brückenspannung ΔU_B und damit die Temperaturänderung ΔT sehr klein gehalten werden, das heißt, der Ist-Wert wird mit sehr guter Näherung dem Soll-Wert entsprechen. Das Verhalten des Regelsystems läßt sich durch Änderung des Soll-Wertes, wie in Abb. (11 b) dargestellt, überprüfen. Um das Regelsystem stabil zu halten, darf eine bestimmte Größe der Verstärkung V nicht überschritten werden. Im geschlossenen Regelkreis treten unvermeidliche Relaxationen auf:

1. in der Heizung bei der Umsetzung von elektrischer Energie in Wärme,
2. bei der Wärmeleitung vom geheizten Material über den Isolator zum Thermistor und
3. innerhalb des Verstärkers.

Auch Störgrößen werden deshalb mit Relaxationen ausgeregelt. Der Regelkreis schwingt nur dann nicht, wenn der Faktor VK bei den Phasendrehungen infolge der erwähnten Relaxationen kleiner 1 ist. Da der Faktor K durch den Aufbau bestimmt ist, kann nur durch eine Veränderung der Verstärkung V die Stabilität des Systems beeinflußt werden. Durch einen Serienwiderstand zum Heizungswiderstand R_H ist eine Reduzierung der Verstärkung V möglich. Wie die Meßergebnisse der angewandten Meßmethoden zeigen werden, tritt eine Anzeigeverzögerung des Meßeffektes nur bei dem isothermen Meßverfahren auf, bei dem sich der Meßwert Δi aus der Änderung des Brückensignals ΔU_B ergibt, das heißt bei einem Meßverfahren, bei dem das Meßvolumen durch die Heizung des Absorbers einen geschlossenen Regelkreis besitzt. Die Größenordnung der auftretenden Relaxation wird zusammen mit den isothermen Meßergebnissen in Abschnitt 4.6 diskutiert.

Die durch den Brückenmeßstrom im NTC-Widerstand auftretende Eigenerwär-

mung ergibt die Größenordnung der kleinsten meßbaren Temperaturdifferenz T, bezogen auf die Umgebungstemperatur

$$i^2 \cdot R = c \cdot T \tag{40}$$

(Erwärmungskonstante c des Thermistor $\approx 0{,}25$ mW/° · C)

Zum Nachweis einer Temperaturdifferenz zwischen dem Ist- und Soll-Wert von $1 \cdot 10^{-3}$ °C ergibt sich für die verwendeten Thermistoren eine maximal zulässige Brückenspannung und eine maximale Brückendiagonalspannung. Mit den handelsüblichen Präzisionswiderständen für die Meß- und Regelbrücken die mit einer Genauigkeit von 0,2 ‰erhältlich sind und einem Temperaturkoeffizienten der verwendeten Thermistoren von r = 4 %/ °C lassen sich noch absolut Temperaturdifferenzen zu der Umgebungstemperatur von $T = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3}}{r} = 5 \cdot 10^{-3}$ °C messen. Bei den vorliegenden Relativmessungen des Ist- und Soll-Wertes dagegen können noch Temperaturänderungen von $\Delta T \leq 1 \cdot 10^{-4}$ °C nachgewiesen werden.

Durch die Wahl der Arbeitstemperatur der drei heizbaren Bauelemente Absorber (T_A), Wärmeisolator ($T_{W\ddot{a}}$) und Dosimeterkapsel (T_K) wird auch der Wärmeverlust W für jedes dieser Regelsysteme festgelegt. Die Änderung ΔW des Wärmeverlustes und damit die Änderung der Temperaturdifferenz eines geheizten Bauelementes zu dem ihn umgebenden Bauelement darf nur so groß sein, daß die geforderte Temperaturkonstanz des auszuregelnden Systems entsprechend Formel (39) erhalten bleibt. Da die Regelkreise in allen Bauelementen einander entsprechen (das heißt (KV + 1) näherungsweise in allen Systemen gleich ist), außerdem ΔU_B der Änderung der Arbeitstemperatur ΔT und $C \cdot \Delta W$ der Änderung der Arbeitstemperaturdifferenz (bei gleichem Proportionalitätsfaktor) proportional ist, gilt für den

(41 a)

$$\text{Absorber} \qquad \Delta T = \frac{\Delta (T_{W\ddot{a}} - T_A)}{KV + 1}$$

$$\text{Wärmeisolator} \qquad \Delta T = \frac{\Delta (T_K - T_{W\ddot{a}})}{KV + 1}$$

$$\text{Dosimeterkapsel} \qquad \Delta T = \frac{\Delta (T_U - T_K)}{KV + 1}$$

wenn T_U die Raumtemperatur der Meßposition ist. Da bei einer Änderung der Umgebungstemperatur eines Regelsystems die Änderung der Systemtemperatur gleichsinnig erfolgt, ist die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen dem geheizten System und seiner Umgebung kleiner als die Temperaturänderung des umgebenden Systems. Es gilt deshalb für die drei heizbaren Bauelemente des Kalorimeters:

(41 b)
$$\Delta (T_{W3} - T_A) < \Delta T_{W3}$$
$$\Delta (T_K - T_{W3}) < \Delta T_K$$
$$\Delta (T_U - T_K) < \Delta T_U$$

Aus Formel (41 a) und (41 b) folgt:

(41 c)
$$\Delta T_A < \frac{\Delta T_{W3}}{KV+1}$$
$$\Delta T_{W3} < \frac{\Delta T_K}{KV+1}$$
$$\Delta T_K < \frac{\Delta T_U}{KV+1}$$

Nimmt man für den Absorber eine maximale Temperaturschwankung von $1 \cdot 10^{-3}$ °C an, so ergeben sich daraus die maximal zulässigen Temperaturschwankungen der den Absorber umgebenden Bauelemente und der Raumtemperatur der Meßposition (siehe Tabelle 2, S. 50)

3.21 Gleichstrombrücke zur Temperaturmessung und Heizstromregelung

Das Prinzipschaltbild zur Temperaturkontrolle und Heizstromregelung mit Wheatstone-Brücken ist in Abb. (12) dargestellt.
Bei Verwendung von 100 KΩ -Thermistoren (R_T) entspricht einer Temperaturänderung von $1 \cdot 10^{-3}$ °C eine Widerstandsänderung von $\Delta R_T \approx 4\Omega$ bei

einer Verlustleistung von $N_{V,max} = 0{,}25\ \mu W/1 \cdot 10^{-3}\ °C$.

Aus

$$i_{R_T,max} = \sqrt{N_{V,max/R_T}} \tag{42}$$

ergibt sich der maximale Brückenstrom $i_B = 1{,}5\ \mu A$, mit dem für die verwendete Brückenspannung von $U_B = 1.35$ V (Mallory-Zelle) der Brückenwiderstand $R_1 = 1\ M\Omega$ wird.*)

Für die symmetrische und nahezu abgeglichene Brücke berechnet sich die Brückendiagonalspannung U_x nach

$$U_x = \frac{U_B \cdot R_1 \cdot \Delta R_T}{(R_1 + R_T)^2} \tag{43}$$

für 100 KΩ Thermistoren, $U_B = 1{,}35$ V, $R_1 = 1\ M\Omega$ und $\Delta R_T = 10^{-3}\ °C$ zu $U_x = 4{,}5\ \mu V$.

Durch den Abschlußwiderstand R_V, den der angeschlossene Verstärker darstellt, wird die Brückendiagonalspannung U_x auf die Meßspannung U_A reduziert,

$$U_A = U_x \cdot \frac{R_V}{R_B + R_V} \tag{44}$$

wobei R_B der Ersatzwiderstand der Brücke ist.

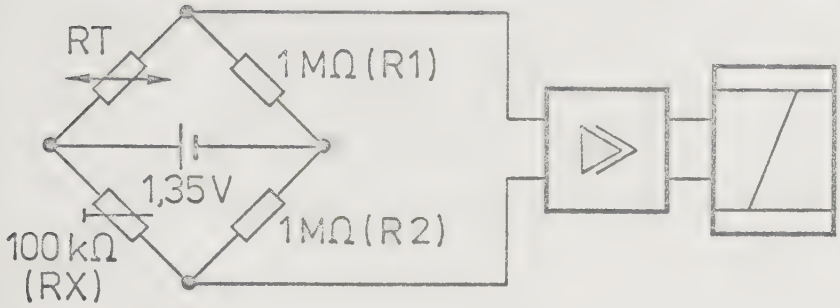
$$R_B = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_T + R_x)}{(R_1 + R_2) + (R_T + R_x)} \tag{45}$$

Da $R_1 \approx R_2$ und die nahezu abgeglichene Brücke $R_T \approx R_x$ ist, wird

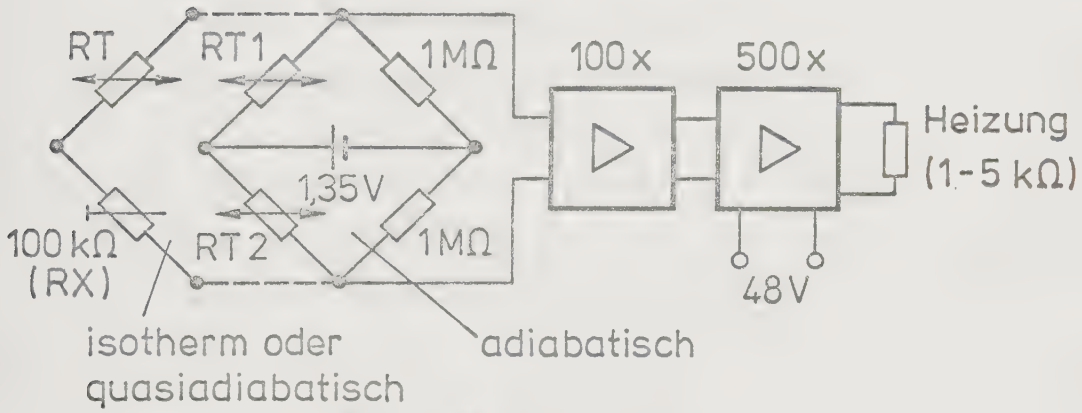
---

*) Für eingebaute Fühler ist durch Wärmeableitung ein größerer Meßstrom zulässig.

Temperatur-Meßkreis



Heizstrom-Regelkreise



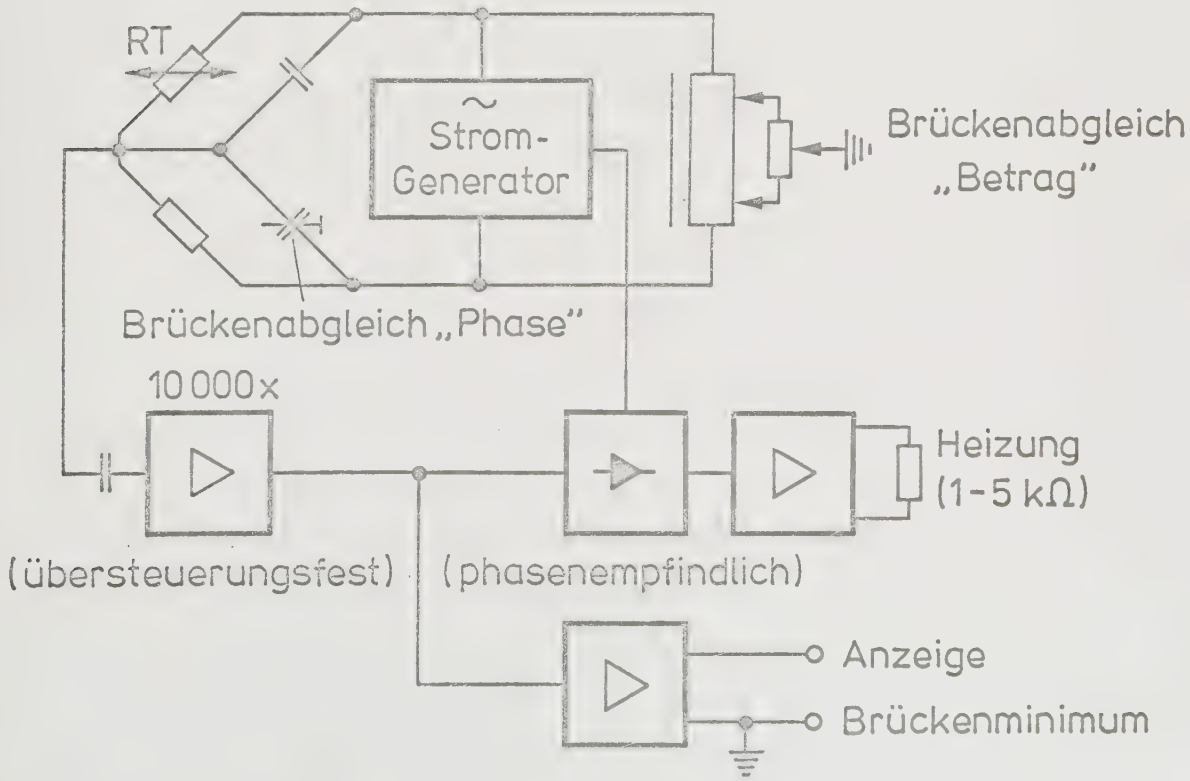


Abb. 12

$$R_B = \frac{2 \cdot R_T \cdot R_1}{R_T + R_1} \approx 2 \cdot 10^5\,\Omega$$

Durch den Abschlußwiderstand $R_V = 2 \cdot 10^6\,\Omega$ des verwendeten Verstärkers tritt bei einer Temperaturänderung von $1 \cdot 10^{-3}\,^{\circ}C$ gemäß Formel (44) am Verstärkereingang eine Spannungsänderung von $U_A \approx 4{,}1\,\mu V$ auf.

3.22 Verstärker zur Heizstromregelung bei Verwendung einer Gleichstrombrücke

Nach 3.21 entspricht einer Temperaturänderung des Thermistors von $1 \cdot 10^{-3}$ eine Spannungsänderung der Wheatstone-Brücke um $4{,}1\,\mu V$. Diese gemessene Brückenspannungsänderung wird durch Verstärkung in zwei Stufen in eine Stellgröße (vgl. Abb. 11 a) verwandelt, die groß genug ist, die Ursache der Störung im Regelkreis, das heißt die Temperaturänderung am Meßort, durch Änderung des Heizstromes wieder aufzuheben.
Damit das Brückensignal von Änderungen des Erdpotentials nicht beeinflußt wird, sind der Meß- und der Heizkreis gemeinsam an einem Punkt geerdet. Der Isolationswiderstand zwischen der Gleichstrombrücke und der Gleichstromheizung, das heißt die Isolation zwischen dem Thermistor und dem ihn umgebenden gewebeäquivalenten Material ist $\geq 100\,M\Omega$.

Die erste Verstärkerstufe des Heizungsregelkreises wird durch einen Transistor-Zerhacker-Verstärker *) gebildet. Dieser Verstärker ist wegen der sehr guten Stabilitäten und des hohen Eigenwiderstandes besonders als Vorverstärker geeignet. Der Vorverstärker liefert eine 100fache Spannungsverstärkung. Die Leistungsabgabe dieses Verstärkers reicht nicht aus, um mit dem so verstärkten Brückensignal die Temperatur des direkt heizbaren Absorbers, Wärmeisolators und der Dosimeterkapsel-Heizung zu erhöhen, so daß eine zweite Verstärkerstufe als Leistungsverstärker vorgesehen werden mußte. Die Schaltung dieses Verstärkers für die Heizung des Absorbers und Wärmeisolators ist in Abb. (13) und für die Heizung der Dosimeterkapsel in Abb. (14) angegeben.

*) Hersteller: Knick, Berlin

Zwei komplementäre Differenzverstärker bilden den ersten Teil des Leistungsverstärkers mit dem Verstärkungsfaktor 50. Der Arbeitswiderstand der Heizung liegt mit seiner Mitte, unabhängig von der Größe des Heizstromes auf Massepotential. Hierdurch kann die Heizstromregelung nicht von Änderungen des Massepotentials beeinflußt werden.

Durch $N_H = i^2 \cdot R_H$ hat das Vorzeichen des Heizstromes keinen Einfluß auf die Heizleistung. Eine Diode verhindert, daß bei negativer Stellgröße ein Heizstrom fließt. Durch die 10fache Spannungsverstärkung des zweiten Verstärkerteiles ergibt sich für den Leistungsverstärker eine Gesamtverstärkung von 500.

3.23 Wechselstrombrücke zur Temperaturmessung und Gleichstromheizung des Absorbers und des Wärmeisolators

Bei Messungen im Strahlenfeld erfüllte die in (3.22) beschriebene Heizstromregelung mit Gleichstrombrücke und Gleichstromheizung nicht die geforderte Genauigkeit. Durch den Einfluß ionisierender Strahlung änderte sich der Isolationswiderstand zwischen dem Thermistor und dem ihn umgebenden heizbaren gewebeäquivalenten Material. In Abhängigkeit von der Größe des Isolationswiderstandes besteht zwischen dem Meß- und Heizkreis eine Gleichstromkopplung. Ändert sich der Isolationswiderstand und damit die Gleichstromkopplung, so kommt es durch Heizstromänderung zu einer fehlerhaften Temperaturregelung.
Dieser Fehler wird vermieden, wenn eine Wechselstrombrücke verwendet wird, die kapazitiv von einer Gleichstromheizung trennbar ist. Die Prinzipschaltung ist in Abb. (12, unten) dargestellt.

Der der Wechselstrombrücke angeschlossene hochohmige übersteuerungsfeste Wechselstromverstärker schaltet den störenden Einfluß des Gleichstromanteils auf die Temperaturregelung aus.

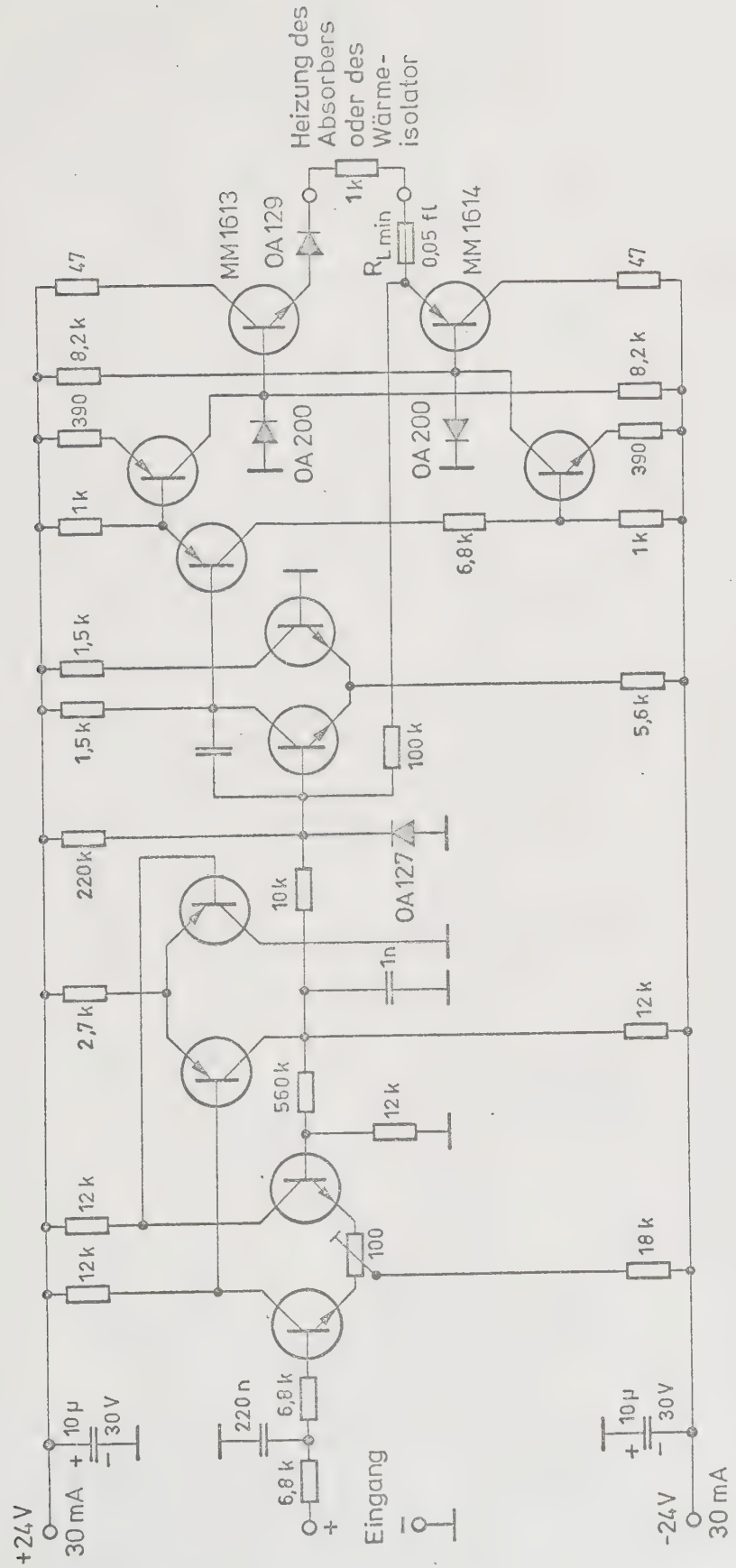
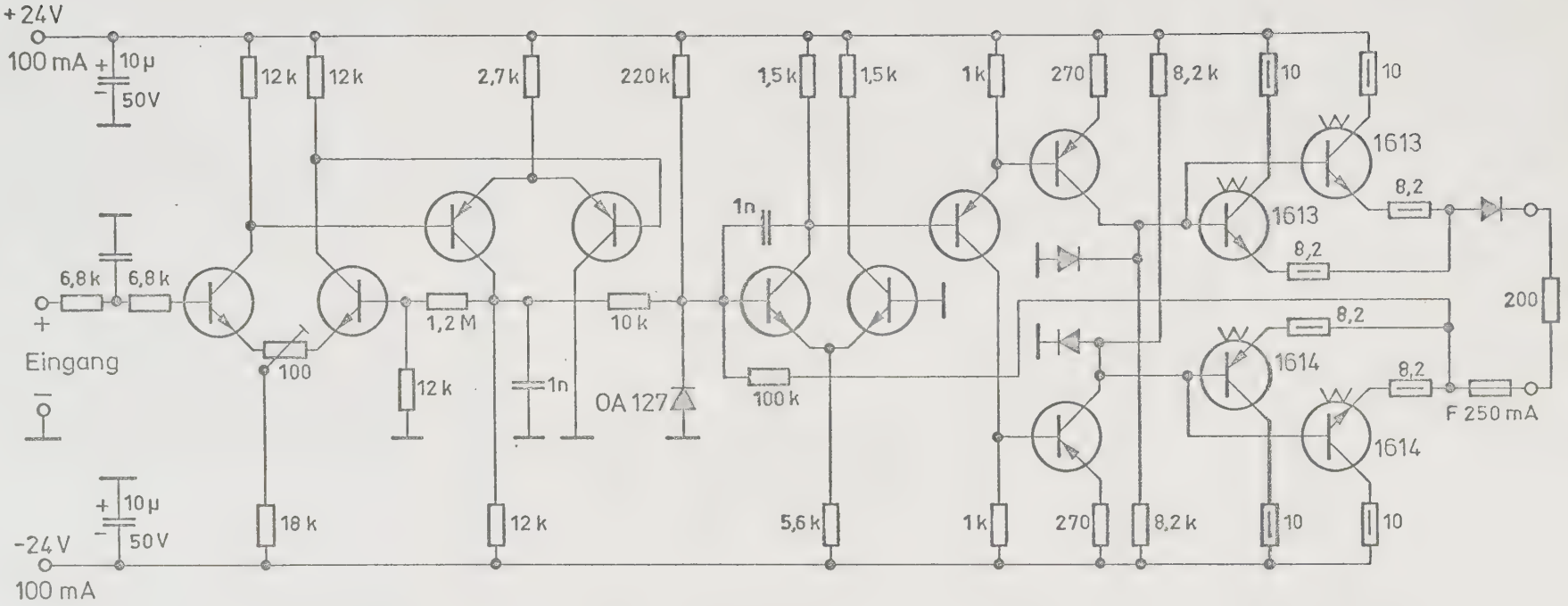


Abb. 13
Heizstromverstärker, verwendet mit einer Gleichstrombrücke zur



Alle nicht bez. npn – Transistoren 2 N 3904
Alle nicht bez. pnp – Transistoren 2 N 3606
Kühlkörper NF 209

V = 1600 ; $U_{a\ max}$ = 40 V symm. ; $R_{L\ min}$ = 0,3 kΩ

Abb. 14
Heizstromverstärker, verwendet mit einer Gleichstrombrücke zur Temperaturregelung der Heizung in der Dosimeter-Kapsel

Der nachfolgende phasenempfindliche Gleichrichter verhindert störende Einstreuungen auf diese hochohmige Brückenanordnung. Das vom Gleichrichter abgegebene Signal wird im Heizungsverstärker auf die erforderliche Größe und Leistung verstärkt. Die Wechselstrombrücke wird sowohl in dem Betrag als auch in der Phase abgeglichen. Der Abgleich des Betrages der Brücke ist durch Kombination von angezapften Transformatoren über Drehschalter und Potentiometer möglich. Der Abgleich der Phase erfolgt mit einem Drehkondensator.

Die Auflösung und Empfindlichkeit der Brückenanordnung mit den nachfolgenden elektronischen Baueinheiten (Schaltbilder siehe Anhang) wurde so bemessen, daß bei einer 10 000fachen Verstärkung des Brückensignals durch die Heizstromregelung eine Temperaturkonstanz von $1 \cdot 10^{-3}$ °C erreicht werden kann.

In Tabelle (2) sind die Verstärkungsfaktoren V für die Gleich- und Wechselstrombrücke und die sich aus der Konstruktion des Kalorimeters ergebenden und durch Messungen bestimmten Proportionalitätskonstanten K angegeben. Zur Aufrechterhaltung einer Temperaturkonstanz des Absorbers von $1 \cdot 10^{-3}$ °C sind nach Formel (41 c) die maximalen Temperaturänderungen der zwei heizbaren Wärmeisolationen und der Umgebungstemperatur berechnet.

3.3 Durchführung der kalorischen Messungen

Die Dosimeterkonstruktion ermöglicht es, Temperaturänderungen im Absorber und Wärmeisolator getrennt mit je einem Thermistor zu messen und die Temperatur im Absorber, Wärmeisolator und in der Dosimeterkapsel durch Heizstromregelung konstant zu halten oder zu ändern. Zur Heizstromregelung sind im Absorber und in der Dosimeterkapsel 1 Thermistor und im Wärmeisolator bis zu 3 Thermistoren eingebaut. Zur Berechnung der vom Absorber aufgenommenen Strahlenenergie ist für die adiabatische und isotherme Meßmethode die genaue Kenntnis des elektrischen Widerstandes des Absorbers erforderlich.

Tabelle 2: Maximal zulässige Temperaturänderungen des Wärmeisolators, der Dosimeterkapsel und der Umgebungstemperatur

	Gleichstrombrücke	Wechselstrombrücke
K	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
V	$5 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{4}$
KV + 1	26	31
max. zulässige Änderungen der Temperaturen in °C		
ΔT_A	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
ΔT_{WE}	$2{,}6 \cdot 10^{-2}$	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$
ΔT_K	0,68	0,96
ΔT_U	17	29

Die Widerstandsmessung ist vor dem Zusammensetzen des Dosimeters direkt am Absorber zwischen den als Elektroden dienenden Zylinderdeckelflächen möglich.

Für den Dosimeterbau wurden nur Preßteile verwendet, bei denen der Widerstand des Absorbers, gemessen zwischen den Heizelektroden 2 - 5 KΩ bzw. des Wärmeisolators 1 - 10 KΩ betrug.
Nach dem Einbau des Absorbers kann sein Widerstand unter Berücksichtigung

des Widerstandes der Zuleitungsdrähte an den Drahtdurchführungen der Dosimeterkapsel kontrolliert werden. *)
In engen Grenzen kann der elektrische Widerstand des Absorbers und des Wärmeisolators durch Änderung des Elektrodenquerschnitts den Bedingungen einer optimalen Heizstromregelung angepaßt werden.

3.31 Das adiabatische Meßverfahren

Die durch Energieabsorption des ungeheizten Absorbers auftretende Temperaturerhöhung wird mit der in (3.21) beschriebenen Wheatstone-Brücke gemessen und, wie in Abb. (12) dargestellt, von dem Temperaturmeßkreis registriert. Eine direkte Angabe der Temperaturänderung ΔT des Absorbers ist durch Verwendung von geeichten Thermistoren möglich. Ist die Temperatur-Widerstandscharakteristik des Meß-Thermistors nicht bekannt, so kann durch Heizen des Absorbers die Widerstandsänderung des Thermistors (in $cal \cdot g^{-1}$) geeicht werden.
Der vor einer Eichung oder Bestrahlung zwischen dem ungeheizten Absorber und dem geheizten Wärmeisolator bestehende adiabatische Gleichgewichtszustand bleibt während der Eichung oder Dosismessung dadurch erhalten, daß entsprechend der dem Absorber zugeführten Energie der Wärmeisolator nachgeheizt wird. Wärmeverluste des allseitig vom Wärmeisolator umgebenden Meßvolumens des Vakuum-Kalorimeters sind durch die wärmeleitenden Anschlußdrähte der Thermistoren und der Heizung möglich und können sich in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Absorber und Umgebungstemperatur ändern. Eine Änderung dieser Wärmeverluste des Meßvolumens wurde vermieden und damit der adiabatische Zustand des Absorbers am besten aufrecht erhalten, in dem die Zuleitungsdrähte des Absorbers mit dem Wärmeisolator wärmeleitend verbunden wurden.

---

*) Die Drahtlänge des verwendeten Manganindrahtes (Ø 0,04 mm) wurde bei den Dosimetern so bemessen, daß sich zusätzlich zum Heizungswiderstand ein Drahtwiderstand von 100 Ω (Abweichung $< 3{,}65\,\Omega \triangleq 10$ mm) ergab.

Die adiabatische Meßmethode erfordert die genaue gegenseitige Anpassung der Widerstandscharakteristiken der Heizstromregelfühler des Absorbers und des Wärmeisolators. Aus der Vielzahl der geeichten Widerstände wurden für jedes Dosimeter Widerstände mit möglichst gleichen Eigenschaften ausgewählt. Durch Kombination der NTC-Widerstände mit linearen Widerständen in Parallel- und Reihenschaltung, dargestellt in Abb. (15), läßt sich eine Anpassung erreichen, bei der die Widerstandsabweichungen kleiner sind als die Brückenempfindlichkeit. Ausreichend ist es, die Widerstände so zu korrigieren, daß die Widerstandsdifferenz für ein bestimmtes, im Bereich der Arbeitstemperatur der Dosimeterkapsel liegendes Temperaturintervall von 0,1 °C kleiner als 0,25Ω (entsprechend einer Temperaturdifferenz $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ °C) wird.

Eine Beeinflussung der Temperatur des Absorbers durch Änderung der Umgebungstemperatur wird verhindert, wenn die Dosimeterkapsel durch Heizstromregelung mit den in (3.2) beschriebenen Regelkreisen auf einer konstanten Temperatur gehalten wird, die höher ist als der größe zu erwartende Temperaturanstieg der Umgebungstemperatur. *)

Die Arbeitstemperatur des Wärmeisolators liegt etwa $5 \cdot 10^{-2}$ °C über der Temperatur der Dosimeterkapsel und wird mit der in (3.2) beschriebenen Heizstromregelung so lange konstant gehalten, bis sich ein Temperaturgleichgewichtszustand zwischen dem Absorber und dem Wärmeisolator eingestellt hat. Der Heizstrom des Wärmeisolators wird bis zu dieser Phase der Messung von den Regelthermistoren des Wärmeisolators gesteuert. Hat sich Temperaturgleichgewicht der Dosimeterbauteile eingestellt, so wird zur Heizstromregelung des Wärmeisolators bei den Bestrahlungen der Vergleichswiderstand R_x der Gleichstrombrücke (vgl. Abb. 12) durch den Regelthermistor R_T des Absorbers ersetzt. Bei diesem kalorischen Meßverfahren wird der Temperaturverlauf von Absorber und Wärmeisolator vor dem Einfluß von Temperaturänderungen der Umgebung nur durch eine heizbare wärmeisolierende Hülle geschützt.

---

*) Die Arbeitstemperatur der Dosimeterkapsel war bis zu 5 °C höher als die maximale Umgebungstemperatur der Meßposition.

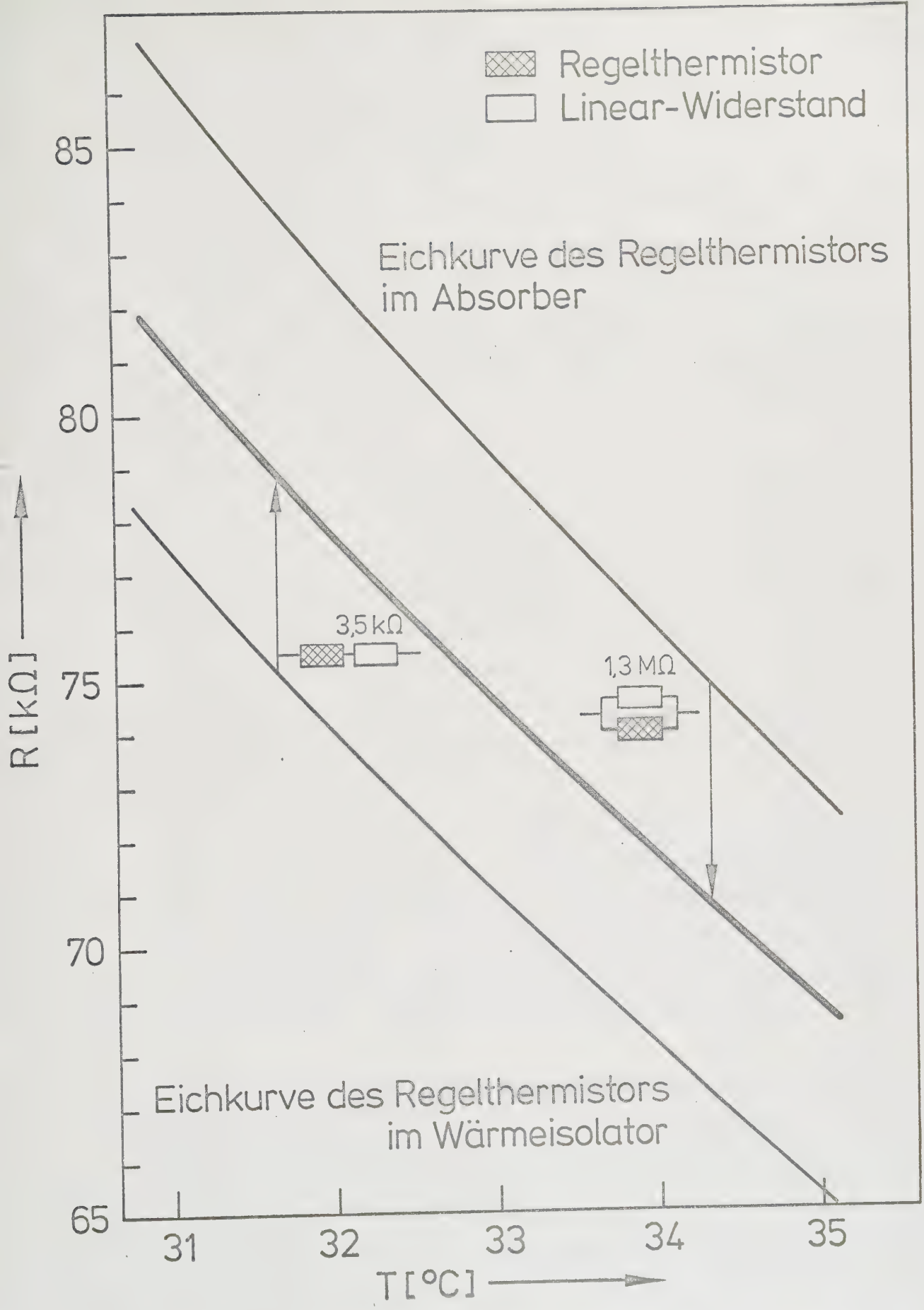


Abb. 15: Änderung der Widerstandscharakteristik von zwei Thermistoren durch lineare Widerstände in Parallel- und Reihenschaltung

3.32 Das isotherme Meßverfahren

Es werden Kalorimeter der gleichen Konstruktion wie bei den adiabatischen Messungen verwendet.

Im Gegensatz zu dem adiabatischen Verfahren wird bei den isothermen Messungen auch der Absorber geheizt. Der Meßeffekt ist die bei Bestrahlung auf tretende Änderung des Absorber-Heizstromes bzw. die notwendige Änderung der Heizleistung zur Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur des Absorbers.

Die geforderte Temperaturstabilität des geregelten Systems (vgl. 3.2) ist nur mit einem Proportionalverstärker endlicher bzw. begrenzter Verstärkung möglich, so daß bei einer Änderung der Dosisleistung, die eine Änderung des Heizstromes und damit der Heizleistung zur Folge hat, eine endliche Abweichung des Ist-Wertes der Temperatur vom Soll-Wert bestehen bleibt. Die Leistungsbilanz, das heißt Änderung der Strahlungsleistung gleich Änderung der Heizleistung, wird nicht mehr genau erfüllt, da sich entsprechend der geringfügigen Temperaturänderung des Absorbers auch die Wärmeabgabe zum umgebenden System ändert.

Die Änderungen der Temperatur und damit der Brückenspannung durch Energiezufuhr von Wärme oder absorbierter Strahlung sind gemäß Formel (39) miteinander verknüpft. Hieraus folgt, daß sich bei einer Änderung der Strahlungsleistung proportional zu $\dot{W}$ die Summe der Leistungsanteile aus Heizung und Absorption um den Anteil $\frac{1}{KV+1}\dot{W}$ ändert. Bei dem vorliegenden Regelsystem mit $(KV+1) > 25$ (vgl. Tabelle 2) ist der Fehler $< 4\ \%$.

Beim isothermen Meßverfahren verhindern zwei wärmeisolierende Hüllen, der Wärmeisolator und die Dosimeterkapsel, daß die Arbeitstemperatur des Absorbers von Temperaturänderungen der Umgebung beeinflußt wird. Die Temperatur des Wärmeisolators und der Dosimeterkapsel wird durch Heizstromregelung mit einer der Absorberheizung entsprechenden Brückenempfindlichkeit während der Messung konstant gehalten.

Die Arbeitstemperatur der Dosimeterkapsel wurde so gewählt, daß sie um ca. 5 °C höher als die maximal zu erwartende Umgebungstemperatur der Meßposition lag. *)

Die Temperatur des Wärmeisolators lag um ca. $5 \cdot 10^{-2}$ °C über der der Dosimeterkapsel. **) Die Temperatur des Absorbers muß so gewählt werden, daß die zur Aufrechterhaltung dieser Temperatur erforderliche elektrische Leistung größer ist als die maximal zu erwartende absorbierte Strahlungsleistung.

---

*) Heizungswiderstand der Dosimeterkapsel ca. 200 Ω , Dämpfung des Regelsystems durch Serienwiderstände von 50 - 100 Ω.

**) Heizungswiderstand ca. 2 KΩ

4 Ergebnisse und Diskussion

Der Auswertung der Meßergebnisse liegen über 600 Einzelmessungen mit 23 kalorischen Dosimetern zugrunde, deren Konstruktion und elektrische Heizstromregelung modifiziert wurden.

4.1 Verwendete Strahlenquellen und Vergleichsdosimeter

Kalorische Messungen im γ-Strahlungsfeld wurden an zwei Meßpositionen verschiedener Strahlungsquellen vorgenommen. Messungen bei konstanter Dosisleistung wurden an einer 40 Ci Co-60 Quelle, Messungen bei variabler γ-Dosisleistung in einem Bestrahlungskanal am Rekombinatortank des BER-Reaktors durchgeführt.*)

Die Ergebnisse der kalorischen Dosimetrie der Energiedosis und der Energiedosisleistung wurden mit den Messungen eines chemischen Dosimeters (Eisensulfat-Dosimeter nach Fricke) verglichen.

Beim Eisensulfat-Dosimeter werden durch Absorption von Strahlung Fe-II-Ionen zu Fe-III-Ionen oxydiert, wobei eine lineare Beziehung zwischen Dosis und Fe-II-Oxydation bis zu einer Meßgrenze von 40 000 R besteht. 1000 R γ-Strahlung setzen $15{,}5 \cdot 10^{-6}$ mol Fe/l um. Oberhalb der angegebenen Dosisgrenze macht sich die Verarmung an dem für die Reaktion benötigten Sauerstoff bemerkbar, so daß die Empfindlichkeit abnimmt. Das Eisensulfat-Dosimeter ist anwendbar bis zu einer Photonenenergie von ca. 2 MeV. Die Fe-III-Ionenkonzentration wurde durch photometrische Messungen im ultravioletten Bereich (3040 AE) mit dem Zeiß-Spektral-Photometer PMQ-II festgestellt.

Das chemische Dosimeter entspricht in seiner Geometrie dem kalorischen Dosimeter. Die Eisensulfat-Lösung befindet sich in einer zylinderförmigen

---

*) Das Energiespektrum der Photonen an der Meßposition wird bestimmt von der Art und der Konzentration der Spaltprodukte im Rekombinator, die von der Reaktorleistung und Betriebsdauer abhängen.

Plexiglaskapsel mit den Abmessungen des Absorbers (Plexiglas und Gewebe haben vergleichbare Absorptionseigenschaften). Entsprechend der Anordnung der Dosimeterbauteile (vgl. Abb. 2) wird auch das dem Absorber entsprechende Plexiglasmodell von dem gewebeäquivalenten Material des Wärmeisolators und einer Aluminiumkapsel umgeben.
Ferner wurde zur direkten Messung der Energiedosisleistung ein für Co-60 γ-Strahlung geeichtes Ionisationskammermeßgerät (Baldwin Ionex-Ionisation-Meter Mark III der Isotope Developments Limited) verwendet.

4.2 Elektrische und thermische Eigenschaften des Wärmeisolators

Die elektrischen und thermischen Eigenschaften des Wärmeisolators ergeben sich nicht nur aus der Zusammensetzung, Herstellung und Bearbeitung des gewebeäquivalenten Materials, sondern werden wesentlich durch die besondere Form des Wärmeisolators bestimmt. Erst die Kenntnis der Eigenschaften des Wärmeisolators führte durch einen optimalen Einbau der Thermistoren zu einer genauen Temperaturkontrolle und damit zu einer Verbesserung der Meßergebnisse.
Der elektrische Widerstand ergibt sich, bei einer dem Absorber entsprechenden Materialzusammensetzung, aus der besonderen Form des Wärmeisolators und der Größe der Heizelektroden. Der Widerstand des Wärmeisolators ist mit 1 - 10 KΩ den Eigenschaften der Heizstromregelung am besten angepaßt.
Zum fehlerfreien Nachweis der absorbierten Energie im Absorber ist eine Heizstromregelung des Wärmeisolators notwendig, die Temperaturänderungen von $1 \cdot 10^{-3}$ °C in allen Volumenelementen ausregelt und so die Temperatur des Wärmeisolators bei calorimetrischen Messungen der des Absorbers anpaßt oder bei isothermen Messungen konstant hält.

Die Funktion der Heizstromregelung des Wärmeisolators läßt sich durch eine Änderung der Brückendiagonalspannung oder durch den Einfluß eines inhomogenen Strahlenfeldes auf den Wärmeisolator nachweisen.
Bei gleicher Änderung des Brückensignals hängt die Temperatur des Wärme-

isolators (vgl. Abb. 16) und die Heizstromänderung (vgl. Abb. 17) von der Lokalisation des Regelthermistors ab (vgl. Abb. 18).

Der Änderung des Brückensignals entspricht erst dann in allen Volumenelementen des Wärmeisolators die gleiche Temperaturänderung, wenn entweder der Thermistor R 3 oder die Thermistoren R 3 und R 4 in Reihenschaltung den Heizstrom regeln.
Neben der Lokalisation der Fühler beeinflußt auch die Anordnung und Größe der Heizelektroden die Heizstromregelung. Vergrößert man zum Beispiel eine Heizelektrode (vgl. Abb. 18), so ändert sich auch der Verlauf der Stromlinien und damit die Beziehung zwischen Heizstrom und Thermistoranzeige. Die beste Heizstromregelung des Wärmeisolators wurde erreicht mit Heizelektroden (H 1), wie sie in Abb. (18) dargestellt sind und bei Verwendung von mindestens zwei Thermistoren in Reihenschaltung, von denen ein Thermistor direkt unter der Heizelektrode und ein zweiter im Zylinderring angeordnet war.

4.3 Einfluß der Außenheizung auf die Wärmeisolation des Absorbers und des Wärmeisolators

Bei den ersten Dosimetern war die Dosimeterkapsel nicht heizbar. Verzichtet man zur Vereinfachung der Konstruktion auf die Außenheizung, so ist der Wärmeisolator bei allen Messungen die einzige wärmeisolierende Hülle des Absorbers.
In diesem Fall sind Beeinflussungen des Absorbers durch Änderung der Umgebungstemperatur nicht mehr vollständig zu vermeiden, weil der Wärmeisolator so geheizt werden muß, daß seine Arbeitstemperatur höher ist als die maximal zu erwartende Umgebungstemperatur. Diese Vergrößerung der Temperaturdifferenz zwischen Wärmeisolator, das heißt also auch zwischen Absorber und Umgebung führt zu einem Energieverlust des Absorbers über die Zuleitungsdrähte, der nicht vernachlässigt werden kann.

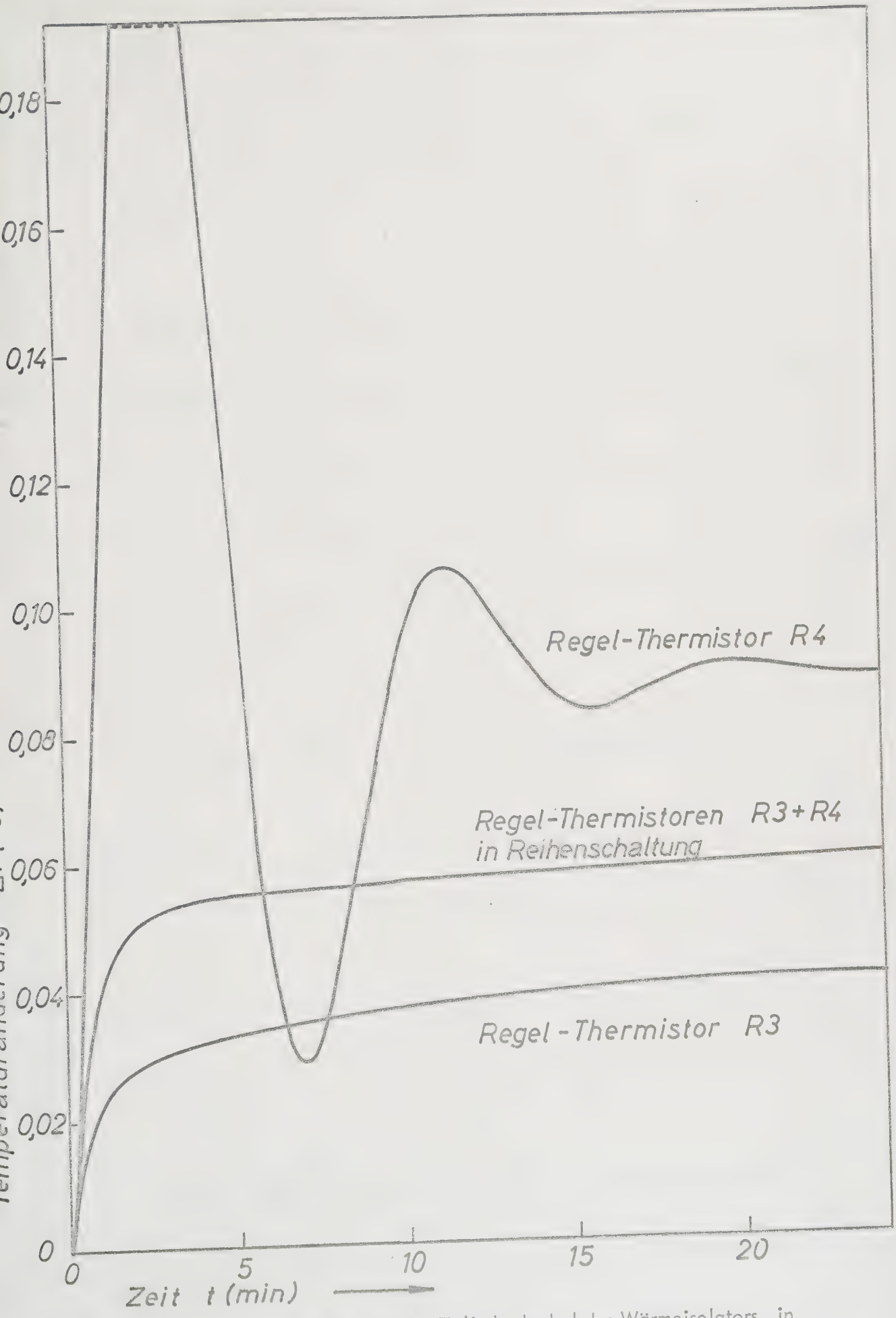
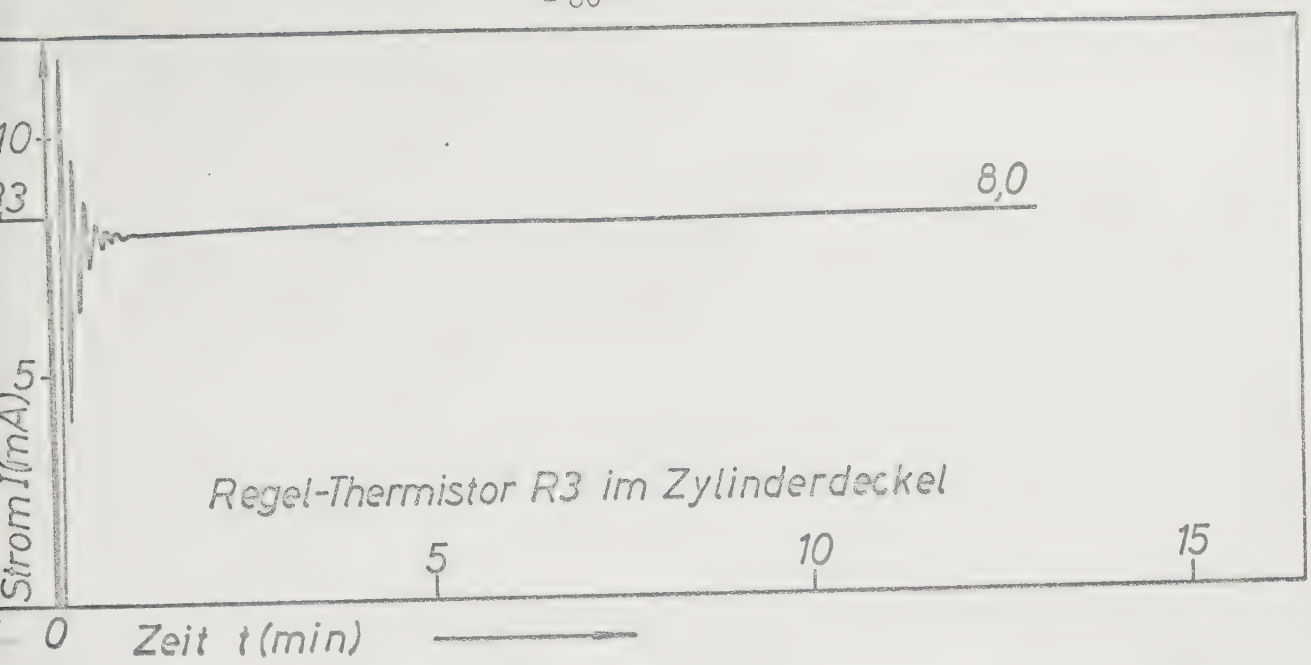
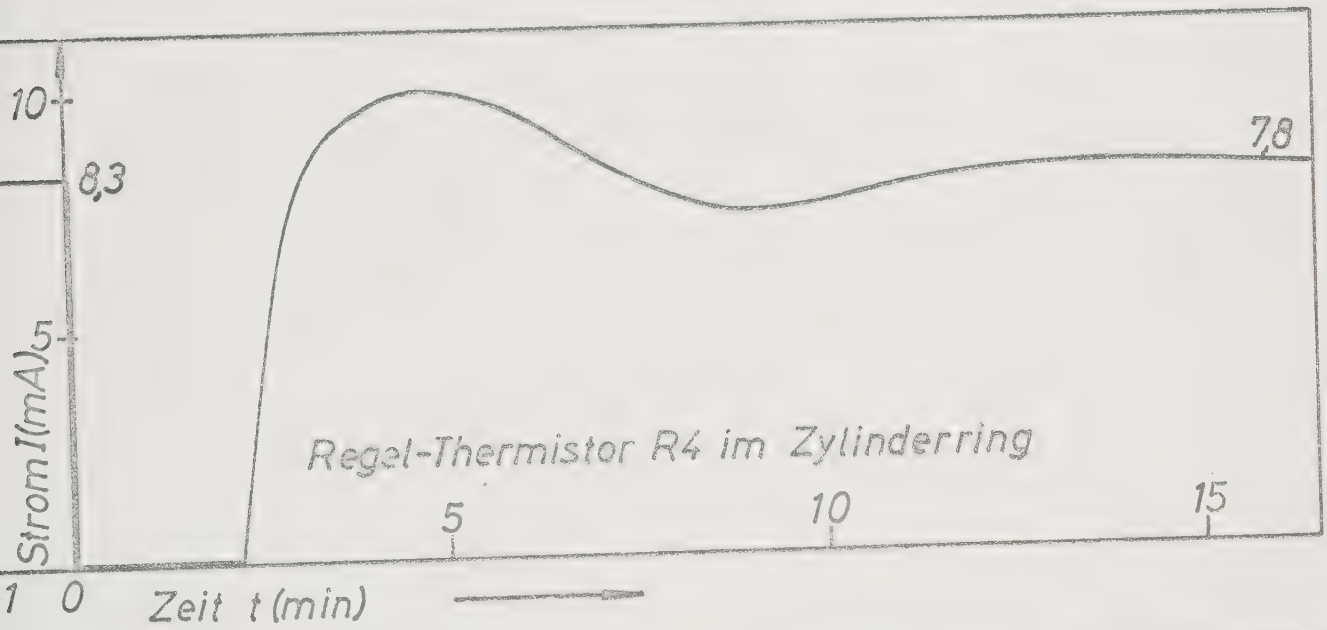


Abb. 16: Temperaturänderung, gemessen im Zylinderdeckel des Wärmeisolators, in Abhängigkeit von der Lokalisation des Regelthermistors bei gleicher Änderung





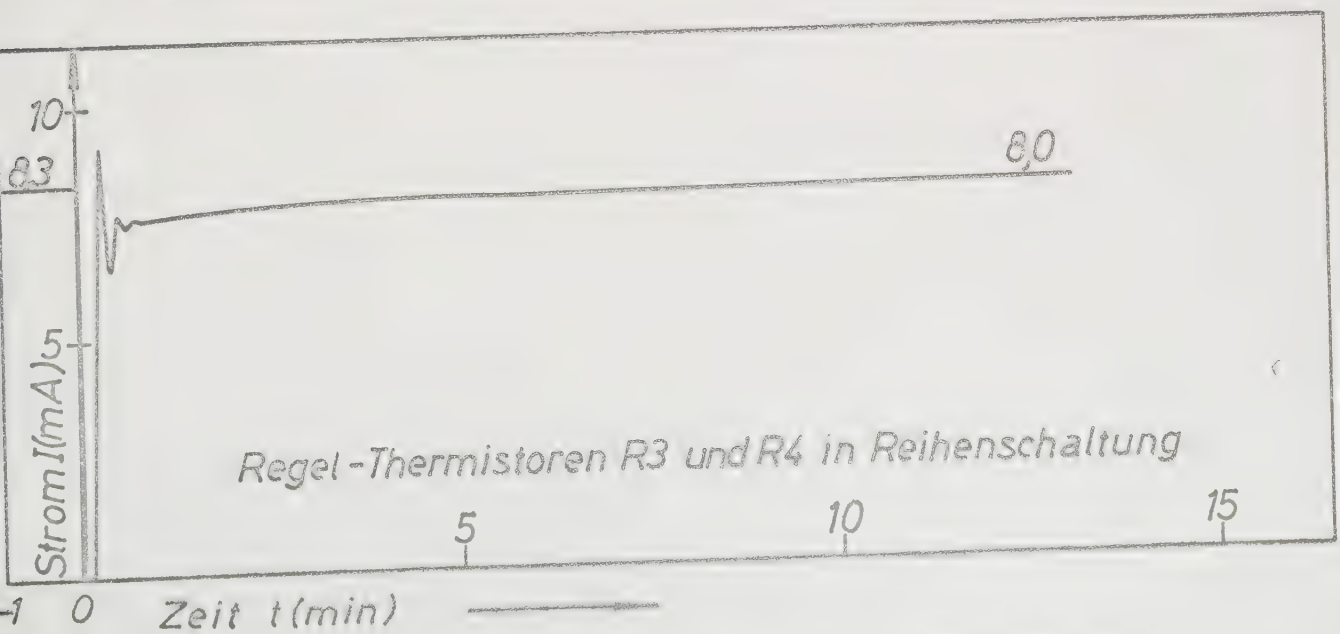
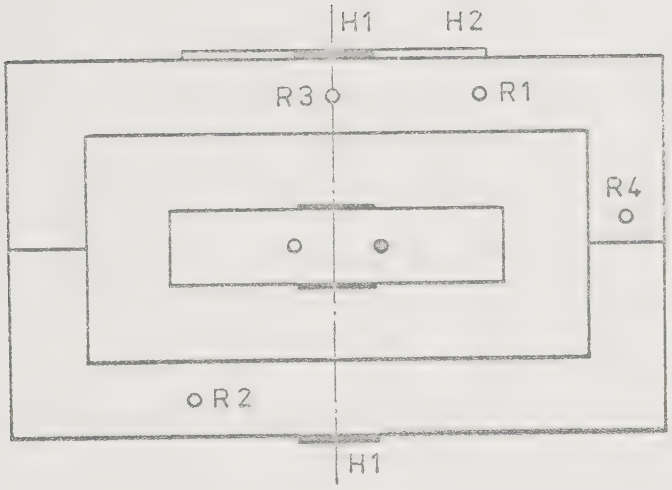


Abb. 17: Abhängigkeit des Heizstromes von der Lokalisation der Thermistoren



● Meß-Thermistor

○ Regel-Thermistoren

H Heizelektroden versch. Größe

Abb. 18
Lokalisation der Thermistoren im Wärmeisolator

Der Vorteil einer zweiten wärmeisolierenden Hülle soll an der empfindlichen Heizstromregelung des Wärmeisolators bei adiabatischen Messungen erläutert werden. Bei dieser Meßmethode wird neben einer genauen Temperaturkontrolle aller Volumenelemente des Wärmeisolators auch eine der Erwärmung des Absorbers entsprechende Temperaturerhöhung des Wärmeisolators durch Heizstromregelung mit den Regelfühlern R_T und R_x (vgl. Abb. 12, Mitte) durchgeführt. Durch die unterschiedliche Isolationsschicht und Kontaktierung der Thermistoren mit dem umgebenden Medium konnte keine Gleichheit der Einbaufehler des Regelfühlerpaares erreicht werden. Die Temperatur der Regelfühler wurde deshalb von Änderungen der Umgebungstemperatur entsprechend der Differenz der Einbaufehler unterschiedlich beeinflußt. Die unterschiedlichen Energieverluste des Regelfühlerpaares in Absorber und Wärmeisolator änderten das zum Meßbeginn bestehende Widerstandsverhältnis und damit den Heizstrom im Wärmeisolator. Die Aufhebung des Temperaturgleichgewichtes der Dosimeterbauteile bewirkte einen stetigen Temperaturanstieg oder -abfall. In Abb. (19) ist der Einfluß einer Änderung der Umgebungstemperatur auf die Absorbertemperatur dargestellt. Sie zeigt, daß durch die Außenheizung Änderungen der Umgebungstemperatur weitgehend kompensiert werden können. Bei Verwendung einer Außenheizung ist dann zur Temperaturkontrolle des Wärmeisolators ein geringer Heizstrom ausreichend, der den Wärmeisolator um ca. $5 \cdot 10^{-2}$ °C über die Temperatur der Dosimeterkapsel erwärmt. Bei dieser geringen Erwärmung des Wärmeisolators ist die Differenz der Einbaufehler der Regelthermistoren so klein, daß Änderungen der Umgebungstemperatur den Energieverlust der Thermistoren in Absorber und Wärmeisolator nicht mehr beeinflussen.

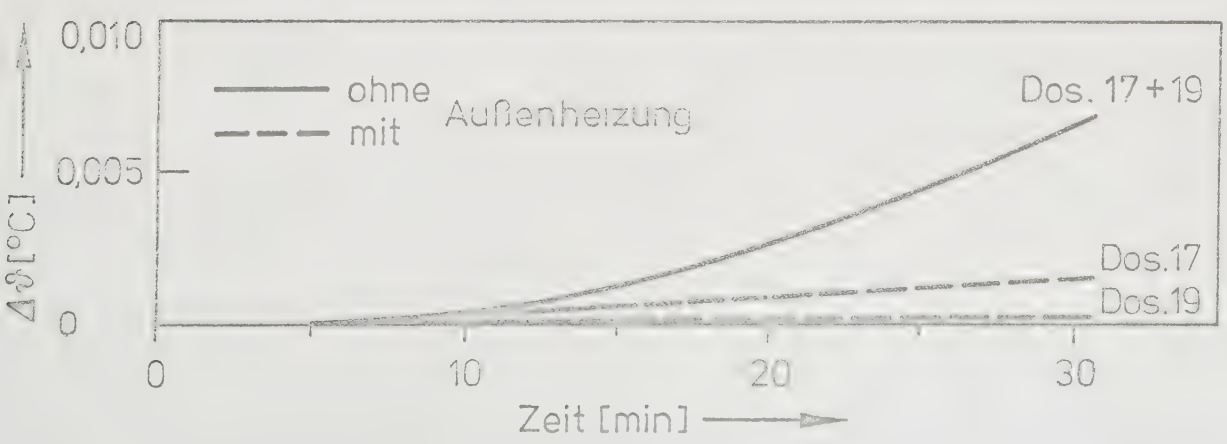


Abb. 19 Zeitliche Änderung der Absorbertemperatur bei Erhöhung der Außentemperatur um 1 °C (zur Zeit $t = 0$)

Bei den zuletzt gebauten Dosimetern wurde durch Verbesserung der Außenheizung und der Verbesserung der Wärmeleitung des gewebeäquivalenten Materials die Heizstromregelung bei adiabatischen und isothermen Messungen von Einflüssen der Umgebungstemperatur unabhängig.

4.4 Quasi-adiabatische Dosismessung

Dosismessungen nach der adiabatischen und quasi-adiabatischen Methode im γ-Strahlungsfeld einer Co-60-Quelle wurden mit 23 kalorischen Dosimetern durchgeführt, deren Eigenschaften nur geringfügig verschieden waren.*) Abb. (20) zeigt am Beispiel eines Dosimeters den gemessenen zeitlichen Verlauf der Temperaturerhöhung im Absorber bei beiden Methoden bei einer konstanten γ-Dosisleistung von $\dot{D}$ = 600 rad/min.
Bei der quasi-adiabatischen Messung ergibt sich aus der Anfangssteigung der Meßkurve eine Anfangsempfindlichkeit (vgl. Formel 32 a) von

$$\varepsilon_o = \frac{1}{\dot{D}} \left.\frac{d(\Delta T)}{dt}\right|_{t \to o} = 3{,}40 \pm 0{,}1 \ \frac{^\circ C/min}{Mrad/min} \quad (\text{bzw.} \quad \frac{^\circ C}{Mrad})$$

Die untere noch nachweisbare Temperaturänderung beträgt $1 \cdot 10^{-3}$ °C. Somit folgt für die Dosis eine untere Nachweisgrenze $D_{min} \approx 300$ rad.
Die spezifische Wärme des Absorbermaterials wurde durch elektrische Aufheizung des Absorbers im eingebauten Zustand zu c = 0,69 ± 0,01 cal/g · °C ermittelt. Vergleichsmessungen mit einem Mischungskalorimeter bestätigten diesen Wert. Aus der gemessenen Anfangsempfindlichkeit ε_o und der spezifischen Wärme c kann nach Formel (32 a) die Wärmeausbeute η des Absorbers berechnet werden. Mit den obigen Werten folgt (mit 1 cal/g $\hat{=}$ $4{,}1855 \cdot 10^5$ rad)

$$\eta = \varepsilon_o \cdot c = 0{,}98 \pm 0{,}05$$

*) Zum Beispiel Verwendung verschiedener Polyamidfraktionen der Shonka-Plastik, Variation des Heizungswiderstandes des Absorbers und Wärmeisolators in den angegebenen Grenzen.

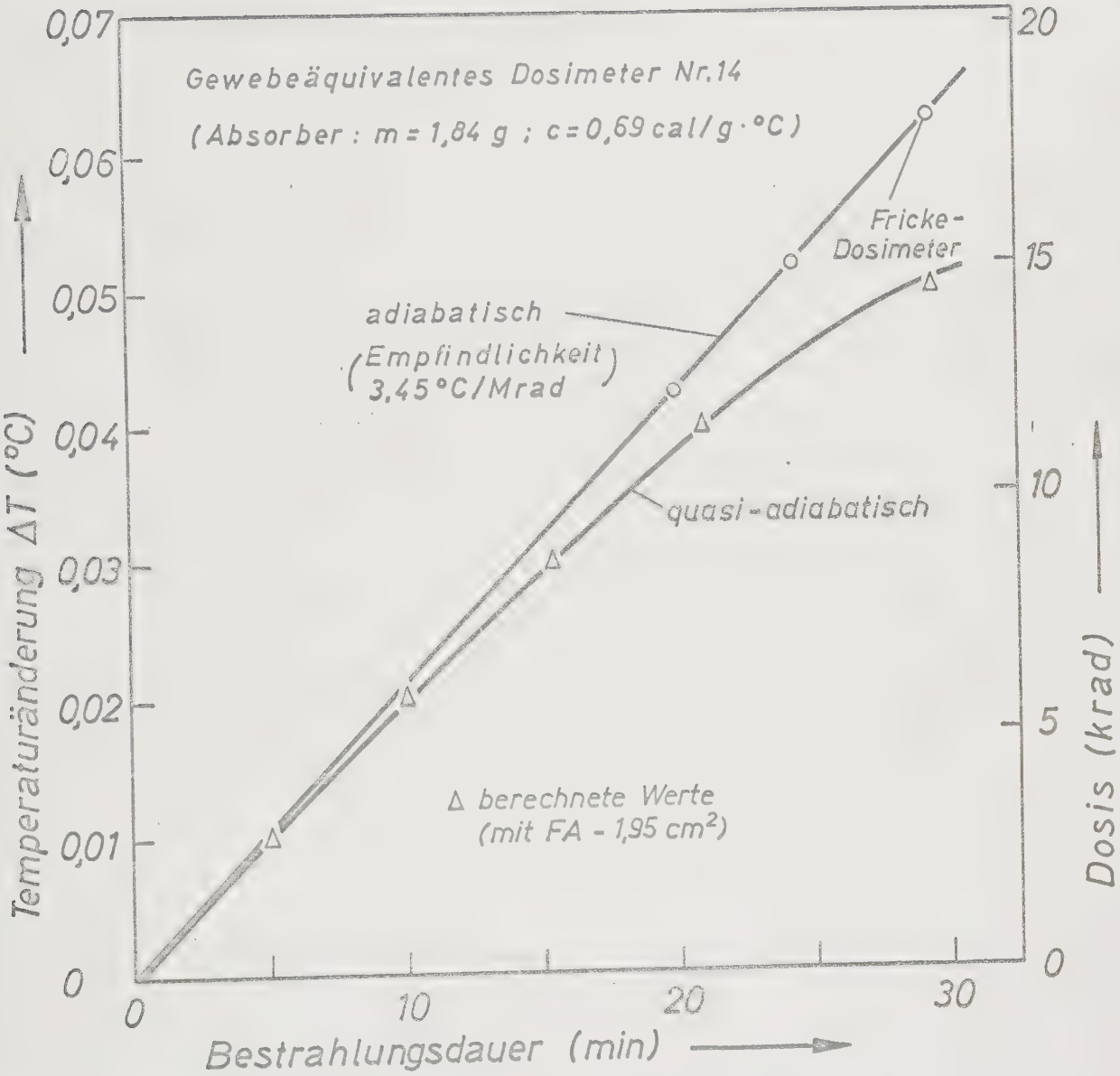


Abb. 20: Zeitliche Änderung der Absorbertemperatur bei Bestrahlung mit konstanter γ-Dosisleistung

Der Mittelwert der Wärmeausbeute stimmt gut überein mit der von SCHMIDT und SÄBEL (24) gemessenen Wärmeausbeute bei Kunststoffen.
Es werden also 98 % der vom Absorber aufgenommenen Strahlungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt, nur etwa 2 % gehen durch endotherme Reaktionen im Absorber verloren.
Aus dem gemessenen Temperaturverlauf beim quasi-adiabatischen Dosimeter kann ferner der Wärmeverlustkoeffizient w (siehe Formel 25 a) ermittelt werden. Abb. (21) zeigt den theoretisch nach Formel (31) zu erwartenden Temperaturverlauf $\Delta T(t)$ für verschiedene Werte des Produktes $w \cdot A$ (A = Oberfläche des Absorbers), wobei eine Absorbermasse von m = 1,84 g, eine spezifische Wärme c = 0,69 cal/g °C des Absorbers und $\eta = 0,98$ eingesetzt wurde. Ein Vergleich mit dem gemessenen Temperaturverlauf zeigt, daß für

$$w \cdot A \approx 0,5 \cdot 10^4 \ \frac{g \cdot rad}{min \cdot {}^\circ C}$$

der berechnete und gemessene Verlauf übereinstimmen. Da die Oberfläche des Absorbers $A = 11\ cm^2$ beträgt, folgt ein Wärmeverlustkoeffizient

$$w \approx 455 \ \frac{g \cdot rad}{cm^2 \cdot min \cdot {}^\circ C}$$

Die Wärmeverluste des Absorbers werden in erster Linie durch Wärmestrahlung verursacht, das heißt es ist $w \approx w_s$.
Ferner ist in Abb. (20) gezeigt, daß die Temperaturmessung im Absorber mit der nach den Gleichungen (31 a) und (31 b) berechneten Temperaturerhöhung übereinstimmt, wenn der Faktor $F \cdot A = 1,95$ cm beträgt. Gemäß Formel (22 a) ergibt sich hieraus mit $F \approx 0,57$ für die nicht mit Leitsilber versehene Oberfläche des Absorbers (das heißt der durch den Graphitgehalt dunkelgrauen Shonka-Plastik) für das relative Emissionsvermögen ein Wert von $s \approx 0,55$. Dieses Ergebnis ist sinnvoll, da das relative Emissionsvermögen von organischen Kunststoffen etwa 0,9 (31) und von Graphit etwa 0,42 (32) beträgt.

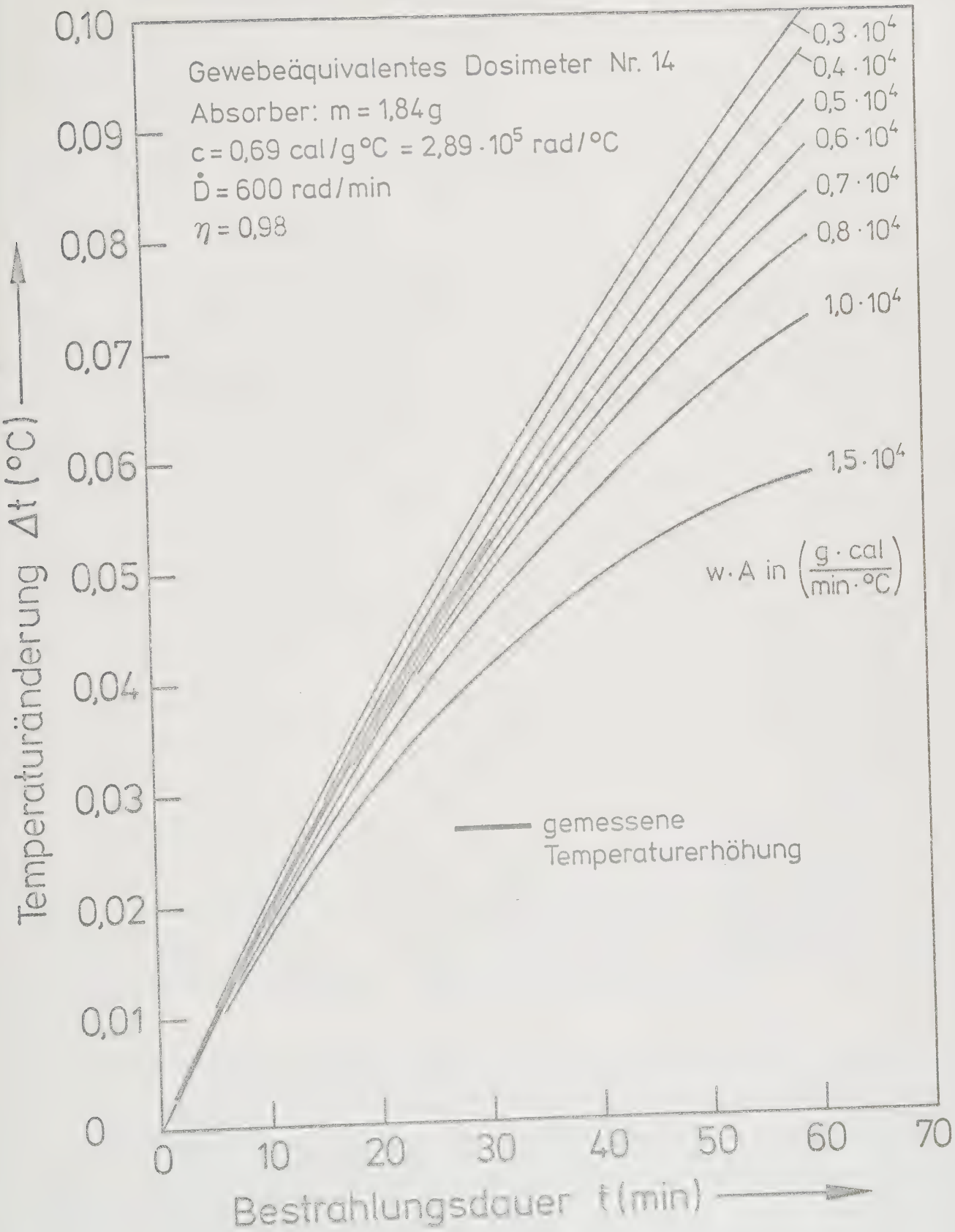


Abb. 21: Berechnete Temperaturerhöhung für verschiedene Werte des Produktes w · A

Die Endtemperatur T_∞ wurde bei den quasi-adiabatischen Messungen nicht ermittelt. Die Empfindlichkeit ε_∞ (siehe Formel 32 b) kann jedoch aus angegebenen Werten für m, η und w · A berechnet werden

$$\varepsilon_\infty = \frac{m \cdot \eta}{w \cdot A} \approx \frac{1{,}84 \cdot 0{,}98}{0{,}5 \cdot 10^4} \quad \frac{g}{\frac{g \cdot rad}{min \cdot {}^\circ C}} = 3{,}6 \cdot 10^{-4} \quad \frac{{}^\circ C}{rad/min}$$

Eine konstante Dosisleistung von 1 Krad/min ergibt somit bei der quasi-adiabatischen Messung im Gleichgewichtszustand eine Temperaturerhöhung des Absorbers gegenüber der umgebenden Wärmeisolation von $\Delta T_\infty = 0{,}36\ {}^\circ C$.
Bei einer unteren Nachweisgrenze von $\Delta T_\infty = 10^{-3}\ {}^\circ C$ beträgt somit die untere Nachweisgrenze

$$\dot{D}_{min} \approx 0{,}003 \ \frac{Krad}{min} = 3 \ \frac{rad}{min} = 180 \ \frac{rad}{h}$$

4.5 Adiabatische Dosismessung

Bei der adiabatischen Dosismessung wird primär die Änderung der Meßbrückenspannung ΔU_B während der Bestrahlung gemessen. Durch Verwendung geeichter Thermistoren kann hieraus die Temperaturänderung ΔT des Absorbers ermittelt werden. In Abb. (20) ist der bei einer konstanten γ-Dosisleistung von 600 rad/min resultierende Temperaturanstieg in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer bei adiabatischer Messung aufgetragen. Dabei wurde das gleiche Dosimeter wie bei der quasi-adiabatischen Messung verwendet, so daß beide Temperaturkurven in Abb. (20) direkt vergleichbar sind.

Im Gegensatz zur quasi-adiabatischen Messung steigt die Absorbertemperatur sehr genau linear mit der Bestrahlungsdauer an. Dies beweist, daß die Nachheizung des Wärmeisolators mit ausreichender Genauigkeit erfolgt, das heißt $T_A - T_{W3} = \text{const.}$ ist und somit auch die Wärmeverluste des Absorbers während der Messung konstant bleiben.

Aus den Meßwerten ergibt sich für das adiabatische Dosimeter eine Empfindlichkeit

$$\epsilon_A = \frac{1}{\dot{D}} \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{\Delta T(t)}{\dot{D} \cdot t} = \frac{\Delta T(t)}{D(t)} = 3{,}45 \pm 0{,}05 \ \frac{^\circ C/min}{Mrad/min}$$

Dabei wurde die mit dem Fricke-Dosimeter gemessene Dosisleistung angesetzt, der angegebene Fehler der Empfindlichkeit wird im wesentlichen durch den Fehler der Dosisbestimmung verursacht. Die Empfindlichkeit des adiabatischen Dosimeters ist somit innerhalb der Fehlergrenzen gleich der Anfangsempfindlichkeit ϵ_o des quasi-adiabatischen Dosimeters. Dies bedeutet, daß der die Wärmeverluste charakterisierende 2. Term auf der rechten Seite der Formel (27) vernachlässigbar ist, das heißt

$$\frac{wA\,(T_A - T_{W3})}{m \cdot \eta \cdot \dot{D}} \ll 1$$

ist. Dieser Befund wird bestätigt, wenn man in diese Ungleichung den aus der quasi-adiabatischen Dosismessung ermittelten Wert

$$w \cdot A \approx 0{,}5 \cdot 10^4 \ \frac{g \cdot rad}{min \cdot ^\circ C}$$

einsetzt. Mit m = 1,84 g, $\dot{D}$ = 600 rad/min, η = 0,98 und der durch die Regelung vorgegebenen Temperaturdifferenz $(T_A - T_{W3}) = 10^{-3}\ ^\circ C$ folgt:

$$\frac{w \cdot A\,(T_A - T_{W3})}{m \cdot \eta \cdot \dot{D}} = 0{,}0047 \ll 1$$

Damit beträgt der Wärmeverlust des Absorbers etwa 0,5 % der aufgenommenen Strahlungsenergie. Dieser Anteil wächst jedoch mit sinkender Dosisleistung an. Bei Dosisleistungen $\dot{D} < 60$ rad/min ist eine unter Berücksichtigung der Fehlergrenzen merkbare Veränderung der Empfindlichkeit des adiabatischen Dosimeters durch Wärmeverluste zu erwarten, wobei jedoch der lineare Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung ΔT und der Dosis erhalten bleibt.

4.6 Isotherme Messung der Energiedosisleistung

Wegen der Inhomogenität des γ-Strahlenfeldes der für die kalorischen Messungen zur Verfügung stehenden Co-60-Quelle wurden die Messungen der Energiedosisleistung unter Anwendung der isothermen Meßmethode in einem dem Rekombinator des Reaktors BER des Hahn-Meitner-Instituts zugeordneten Bestrahlungskanal durchgeführt, in dem sich in Abhängigkeit von der Reaktorleistung die Energiedosisleistung des γ-Strahlenfeldes ändert. Diese Bestrahlungsposition wurde außerdem gewählt, um die bei isothermen Kalorimetern auftretende Anzeigeverzögerung in Abhängigkeit von der Größe der Dosisleistungsänderung zu bestimmen.

In Abb. (22) ist die isotherm gemessene Änderung der vom Kalorimeter aufgenommenen spezifischen Energie pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit bei einem schnellen Anstieg der Reaktorleistung von 5 W auf 50 KW aufgetragen. Gleichzeitig wurde die γ-Dosisleistung in einer benachbarten Position mit einer Ionisationskammer registriert. Das Verhältnis der γ-Dosisleistung zwischen der Position des Kalorimeters bzw. des Absorbers und der Ionisationskammer wurde mit einem der Form des Absorbers angepaßten Fricke-Dosimeter bestimmt, um die mit der Ionisationskammer gemessene Dosisleistung auf die Position des Kalorimeters (Absorbers) umrechnen zu können. Gleichzeitig wurde hierdurch die Ionisationskammer geeicht. Die auf die Position des Absorbers bezogene γ-Dosisleistung der Ionisationskammer ist ebenfalls in Abb. (22) eingetragen (gestrichelte Kurve). Die Messungen waren mit mehreren kalorischen Dosimetern gleicher Konstruktion und Funktion bei gleichen Arbeitsbedingungen der Dosimeter und bei gleicher Zeitabhängigkeit der Dosisleistungsänderung der Meßposition reproduzierbar.

Zeitliche Verzögerung der Anzeige des isothermen Kalorimeters

Wie die Messungen in der gewählten Bestrahlungsposition des Reaktors (vgl. Abb. 22) zeigen, ist die Anzeige des isothermen Kalorimeters gegenüber der Anzeige einer Ionisationskammer, abhängig vom Betrag der Dosisleistungsänderung, zeitlich verzögert.

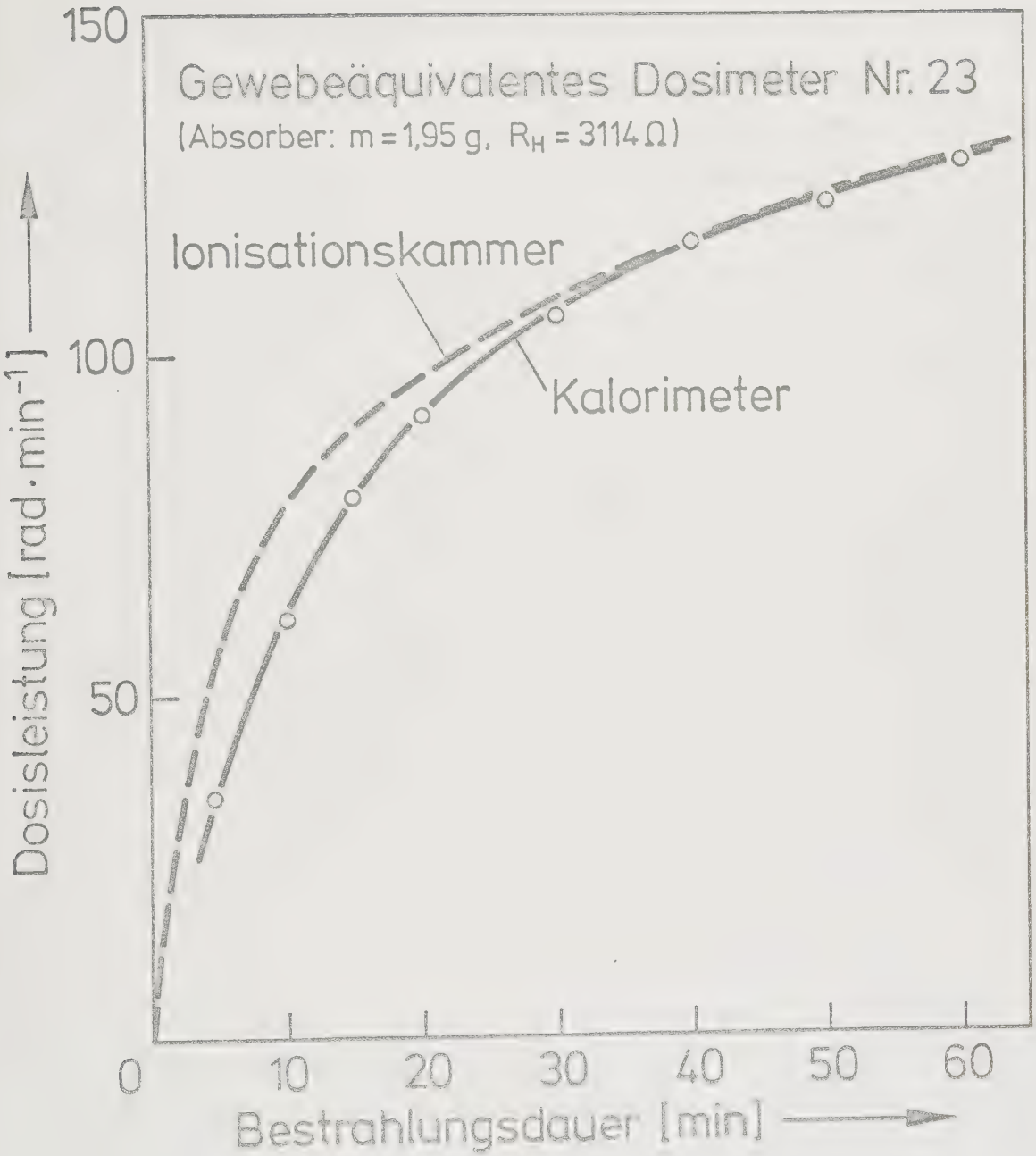


Abb. 22: Zeitliche Änderung der Energieabsorption in Abhängigkeit von der γ-Dosisleistung

Die Relaxation der Anzeige beim isothermen Meßverfahren ist gegeben durch die von dem Betrag der einwirkenden Störgröße (Änderung der Dosisleistung) abhängigen Einstellzeit des neuen Gleichgewichtszustandes, in der durch die Änderung des Heizstromes der Ist-Wert der Thermistoren wieder dem Soll-Wert der Brücke angepaßt wird. Im wesentlichen wird diese Zeitabhängigkeit des Regelvorganges bestimmt durch den Wärmeübergang von den geheizten Segmenten des gewebeäquivalenten Materials über die Isolationsschicht zum Thermistor. Der Begriff "geheiztes Segment" soll andeuten, daß ein gleichzeitiges und damit gleichmäßiges Heizen aller Volumenelemente des Absorbers auch bei voller Ausnutzung der Zylinderdeckelflächen als Heizelektroden sicherlich nicht erfolgt.

Das Regelverhalten des isothermen Kalorimeters bei Bestrahlung wird deutlich, wenn man die Störgröße "Energieabsorption" sprungweise ändert. In Abb. (23) ist der zeitliche Verlauf des Absorber-Heizstromes als Folge dieser Sprungfunktion dargestellt, wenn zur Zeit $t = 0$ die Bestrahlung des Dosimeters mit einer konstanten Dosisleistung von 600 rad/min beginnt.

Auch bei der Bestrahlung, bei der alle Volumenelemente des Absorbers, des Thermistors und der Thermistorisolationsschicht, die annähernd die gleichen Absorptionseigenschaften besitzen, gleichzeitig um den gleichen Betrag erwärmt werden, stellt sich trotz sofortiger Heizstromregelung der neue Gleichgewichtszustand erst mit zeitlicher Verzögerung ein. Die Relaxationszeit hängt dabei von der Dosisleistung bzw. der Heizleistung ab.

Die Heizstromregelung des Wärmeisolators entspricht im Prinzip der des Absorbers, jedoch kann zum Beispiel durch die von einander abweichenden geometrischen Abmessungen beider heizbaren Systeme ein unterschiedlicher zeitlicher Temperaturverlauf resultieren. (Auf die konstruktiven Möglichkeiten, die Temperaturregelung zu beeinflussen, wurde in 4.2 hingewiesen, vgl. Abb. (16) und (17)). Auch unter der Annahme, daß die Störgröße "Energieabsorption" für den Absorber und Wärmeisolator gleich groß ist, können die Temperaturschwankungen beider Systeme zeitlich von einander abweichen. Das zeitliche Verhalten des Absorber-Heizstromes bei einer Änderung der Dosisleistung kann deshalb bis zum Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes

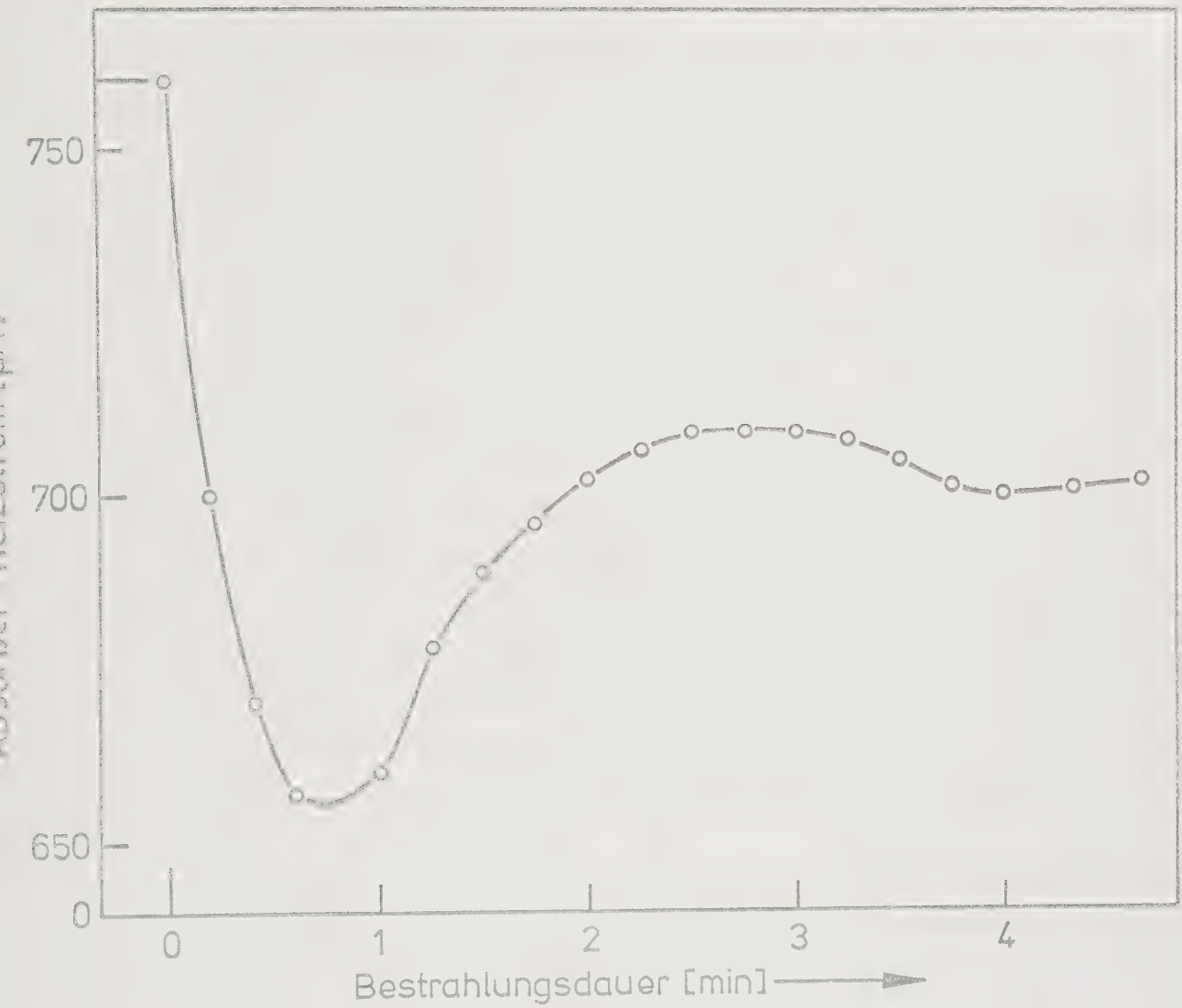


Abb. 23:

Änderung des Absorber-Heizstromes bei momentaner Erhöhung der Dosisleistung um $6 \cdot 10^2$ rad/min.

beider Systeme auch durch eine Änderung des Wärmeaustausches zwischen Absorber und Wärmeisolator beeinflußt werden.
Außerdem ist das Verhalten der Heizstromregelung abhängig von dem gewählten Arbeitspunkt, das heißt dem Ruhestrom vor der Strahlungsänderung und von der relativen Änderung des Heizstromes, für die noch Linearität zwischen Heizstrom bzw. Heizspannung und Temperaturänderung gemäß Formel (36 a) angenommen werden kann.
Wird der Ruhestrom sehr groß gewählt, so ist

1. der Nachweis großer Dosisleistungsänderungen möglich,
2. wird der Faktor K größer, so daß Temperaturabweichungen vom Soll-Wert gering bleiben und
3. die Relaxationszeit verkürzt.

Eine relativ geringe Heizstromänderung führt jedoch zu einer Ungenauigkeit bei der Ablesung des Meßeffektes. Deshalb wird man den Ruhestrom so klein wählen, daß die elektrische Heizleistung des Absorbers nur geringfügig größer ist als die maximal zu erwartende Strahlungsleistung im Absorber.

Der gemessene zeitliche Verlauf der Heizstromregelung (vgl. Abb. 23) läßt sich durch interne Vorgänge im Absorber erklären. Bei sprungweise einsetzender Bestrahlung wird durch Energieabsorption im Thermistormaterial momentan Erwärmung registriert, der Heizstrom wird reduziert. Bedingt durch die Isolationsschicht des Thermistors wird die Reduktion der Heizleistung erst mit einer zeitlichen Verzögerung vom Thermistor gemessen. Der Heizstrom und die Absorbertemperatur werden daher zunächst stärker sinken, als es dem neuen stationären Zustand entspricht. Durch dieses Überschwingen von Temperatur bzw. Heizstrom stellt sich der stationäre Zustand nicht monoton ein.
Zur Bestimmung des Relaxationsverhaltens des isothermen Dosimeters kann angenommen werden, daß in erster Näherung die zeitliche Änderung dN/dt der elektrischen Heizleistung N(t) des Absorbers proportional der Differenz zwischen der vom Absorber durch Strahlung aufgenommenen Wärmeleistung $N_s(t)$ und der Änderung der Heizleistung $\Delta N = N_o - N(t)$ gegenüber der

Anfangsleistung $N(0) = N_o$ ist.
Es gilt also

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{T}\left[N_s(t) - \Delta N(t)\right] \tag{46}$$

wobei $N_s(t) = m \cdot \eta \cdot \dot{D}(t)$ einzusetzen ist. T wird im folgenden als Relaxationszeit des Kalorimeters bezeichnet.
Die in der Meßposition am Rekombinator des Reaktors mit einer relaxationsfreien Ionisationskammer gemessene Dosisleistung (vgl. Abb. 22) läßt sich durch die Funktion

$$\dot{D}(t) = A\,(1 - e^{-t/\tau}) + Bt \tag{47}$$

mit $A = 85$ rad/min, $B = 0{,}81$ rad/min^2, $\tau = 0{,}195$ min darstellen. Durch Einsetzen von Formel (47) in Formel (46) ergibt sich als Lösung der Differentialgleichung (46) für die von dem isothermen kalorischen Dosimeter angezeigte Dosisleistung

$$\dot{D}_{Kal}(t) = \frac{\Delta N(t)}{m} = \eta \cdot A \cdot \left[1 - \frac{\tau}{\tau - T} e^{-t/\tau} + \frac{T}{\tau - T} e^{-t/T}\right] + \eta \cdot B \cdot \left[t - T + T \cdot e^{-t/T}\right] \tag{48 a}$$

Für den Grenzfall $T = \tau$ gilt

$$\dot{D}_{Kal}(t) = \eta \cdot A + \eta \cdot B \cdot \left[t - T + T \cdot e^{-t/T}\right] \tag{48 b}$$

Abb. (24) zeigt den nach Formel (48 a) für verschiedene Relaxationszeiten T berechneten zeitlichen Verlauf der Dosisleistung $\dot{D}_{Kal}$ im Vergleich zu der mit dem Kalorimeter gemessenen Dosisleistung. Ferner ist der wahre Verlauf der Dosisleistung aufgetragen, wie er sich aus der Messung mit der Ionisationskammer ergibt.

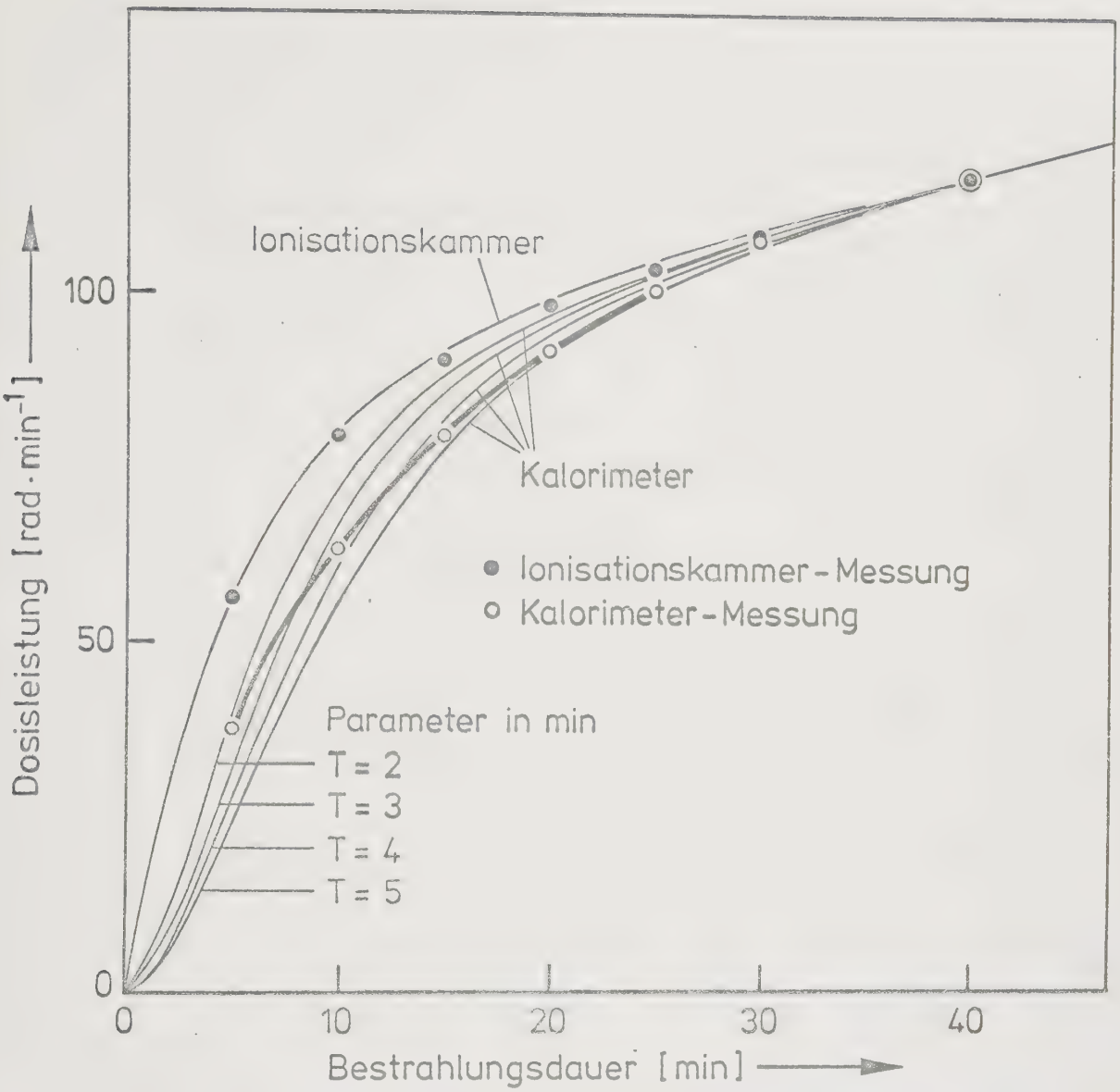


Abb. 24: Berechnete Anzeige der Dosisleistung in Abhängigkeit vom Parameter T

Der Vergleich zeigt, daß die Relaxationszeit T des Kalorimeters nicht konstant ist. Während der ersten Minuten nach Beginn der Bestrahlung beträgt die Relaxationszeit etwa 2 Minuten. Oberhalb 15 Minuten Bestrahlungsdauer deckt sich die gemessene und berechnete Kurve, wenn man eine Relaxationszeit von etwa T = 5 Minuten ansetzt. Unabhängig von dem Strahlungsfeld und seiner zeitlichen Änderung ist daher mit einer Relaxationszeit des vorliegenden isothermen Dosimeters in der Größenordnung von 2 - 5 Minuten zu rechnen. Im Gleichgewichtszustand beträgt die Empfindlichkeit des isothermen Dosimeters

$$(49) \qquad \varepsilon_i = \frac{\Delta N_{el}/m}{\dot{D}} = 0{,}16 \pm 0{,}008 \ \frac{\mu W/g}{rad/min}$$

bzw. bei Umrechnung auf gleiche Einheiten

$$\varepsilon_i = \eta \approx 0{,}96$$

Die unterste Nachweisgrenze des isothermen Meßverfahrens zur Bestimmung der Energiedosisleistung ergibt sich

1. aus der Genauigkeit, die durch Energieabsorption bedingte Heizstromänderung zu messen und
2. durch die bei Verwendung eines Proportionalverstärkers bei Änderung der Heizleistung eintretende Temperaturabweichung (vgl. 3.32).

Bei den durchgeführten Messungen betrug der Ruhestrom i_o im Absorber vor Beginn der Bestrahlung etwa 200 μA. Durch Kompensation des vor Meßbeginn bestehenden Absorber-Heizstromes wurde die Genauigkeit der Messung des durch Änderung der Energiedosisleistung eintretenden Absorber-Heizstromes so vergrößert, daß Änderungen des Absorber-Heizstromes von 0,5 μA mit einem Fehler von ± 1 % nachgewiesen werden konnten. Kontinuierlich während der Änderung der Energiedosisleistung aufgezeichnete Temperaturmessungen im Absorber und Wärmeisolator zeigten, daß trotz der Verwendung eines Proportionalverstärkers die Temperatur in beiden Systemen auf $1 \cdot 10^{-3}$ °C konstant gehalten werden konnte.

Bei den vorliegenden isothermen Messungen beträgt die minimal nachweisbare Änderung der spezifischen Heizleistung bei einem Ruhestrom I_o von etwa 200 μA etwa 0,6 μW/g, was gemäß Formel (49) einer Dosisleistung $\dot{D}_{min} \approx 4$ rad/min entspricht. Der Meß- und Regelfehler bei dieser Heizleistung beträgt etwa $\pm$ 5 %. Diese untere Nachweisgrenze kann noch weiter gesenkt werden, wenn der Ruhestrom auf einen Wert reduziert wird, der noch den vollständigen Nachweis der Energieabsorption ermöglicht.

4.7 Vergleich der Meßmethoden

Bei einem Vergleich der Meßverfahren sind insbesondere folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

1. Eignung für kontinuierliche Messung oder nur für Einzelmessung der Dosisleistung,
2. Empfindlichkeit und Genauigkeit des Meßverfahrens,
3. Nachweisgrenze des Meßverfahrens,
4. Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur,
5. Experimenteller Aufwand.

Zunächst ist ein prinzipieller Unterschied zwischen dem adiabatischen und dem quasi-adiabatischen Meßverfahren auf der einen Seite und dem isothermen Meßverfahren auf der anderen Seite festzustellen. Bei den beiden adiabatischen Verfahren werden Einzelmessungen der Dosisleistung durchgeführt, wobei die Dosisleistung während der Meßzeit konstant sein muß. Demgegenüber ermöglicht das isotherme Meßverfahren eine kontinuierliche Messung und Registrierung der Dosisleistung, Änderungen der Dosisleistung werden exakt erfaßt, sofern die Dosisleistungsänderung in einer Zeit erfolgt, die groß ist im Vergleich zur Relaxationszeit des isothermen Dosimeters.

Bei den beiden adiabatischen Meßverfahren wird der Temperaturanstieg des Absorbers während einer begrenzten Meßzeit (Bestrahlungsdauer) gemessen, wobei die Steilheit des Temperaturanstiegs von der Dosisleistung abhängt.

Abb. (25) zeigt als Beispiel einen Vergleich des Temperaturanstiegs bei adiabatischer und quasi-adiabatischer Messung für verschiedene Werte der Dosisleistung. Beim adiabatischen Verfahren steigt die Absorbertemperatur streng linear mit der Bestrahlungsdauer an, während beim quasi-adiabatischen Verfahren der Temperaturverlauf infolge der steigenden Wärmeverluste einer Sättigungskurve entspricht. Das bedeutet, daß die Empfindlichkeit des adiabatischen Dosimeters konstant ist, während sie beim quasi-aidabatischen Dosimeter mit zunehmender Bestrahlungsdauer abnimmt. Dies zeigt Abb. (26), in der das Verhältnis der Empfindlichkeit des quasi-adiabatischen Dosimeters zu derjenigen des adiabatischen Dosimeters in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer aufgetragen ist. Die zulässige Meßdauer bzw. Bestrahlungsdauer bei dem quasi-adiabatischen Dosimeter ist daher begrenzt und hängt von der geforderten Genauigkeit ab.

Tabelle (3) zeigt eine Gegenüberstellung der Empfindlichkeiten und Nachweisgrenzen der drei Meßverfahren für Dosimeter gleicher Geometrie. Bei dem quasi-adiabatischen Dosimeter ist die Anfangsempfindlichkeit ε_o angegeben, die innerhalb der Fehlergrenzen mit der Empfindlichkeit des adiabatischen Dosimeters übereinstimmt. Die Abnahme der Empfindlichkeit des quasi-adiabatischen Dosimeters mit zunehmender Bestrahlungszeit (vgl. Abb. 26) bedeutet jedoch, daß das quasi-adiabatische Dosimeter hinsichtlich seiner Empfindlichkeit dem adiabatischen Dosimeter unterlegen ist. Bei dem adiabatischen Dosimeter ist die Empfindlichkeit unabhängig von der Dosisleistung, sofern bei der vorliegenden Bauweise der Dosimeter die Dosisleistung größer als etwa 50 rad/min ist. Bei kleineren Werten der Dosisleistung nimmt die Empfindlichkeit infolge von Wärmeverlusten ab. Im Vergleich zu dem quasi-adiabatischen Dosimeter hat das adiabatische Verfahren ferner den Vorteil, daß wegen der Linearität des Temperaturanstiegs die Genauigkeit der Dosisleistungsmessung größer ist.

Bei dem isothermen Meßverfahren ist die Empfindlichkeit unabhängig von der Dosisleistung und Bestrahlungsdauer. Auch die Meßgenauigkeit ist größer im Vergleich zu den anderen Verfahren, da die Änderung der Heizleistung bzw.

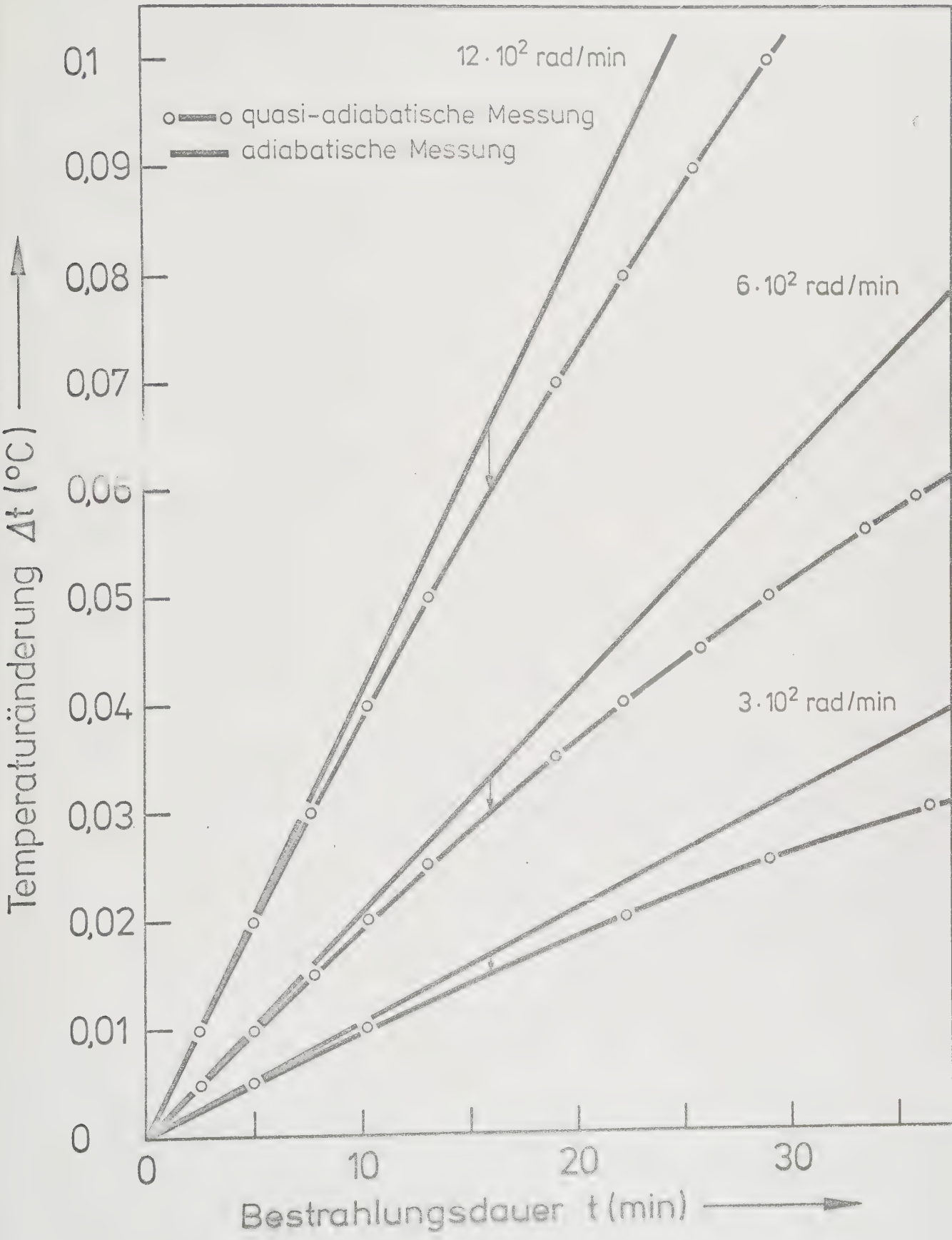


Abb. 25: Zeitliche Änderung der Absorbertemperatur des adiabatischen und quasi-adiabatischen Kalorimeters berechnet für verschiedene Dosisleistungen

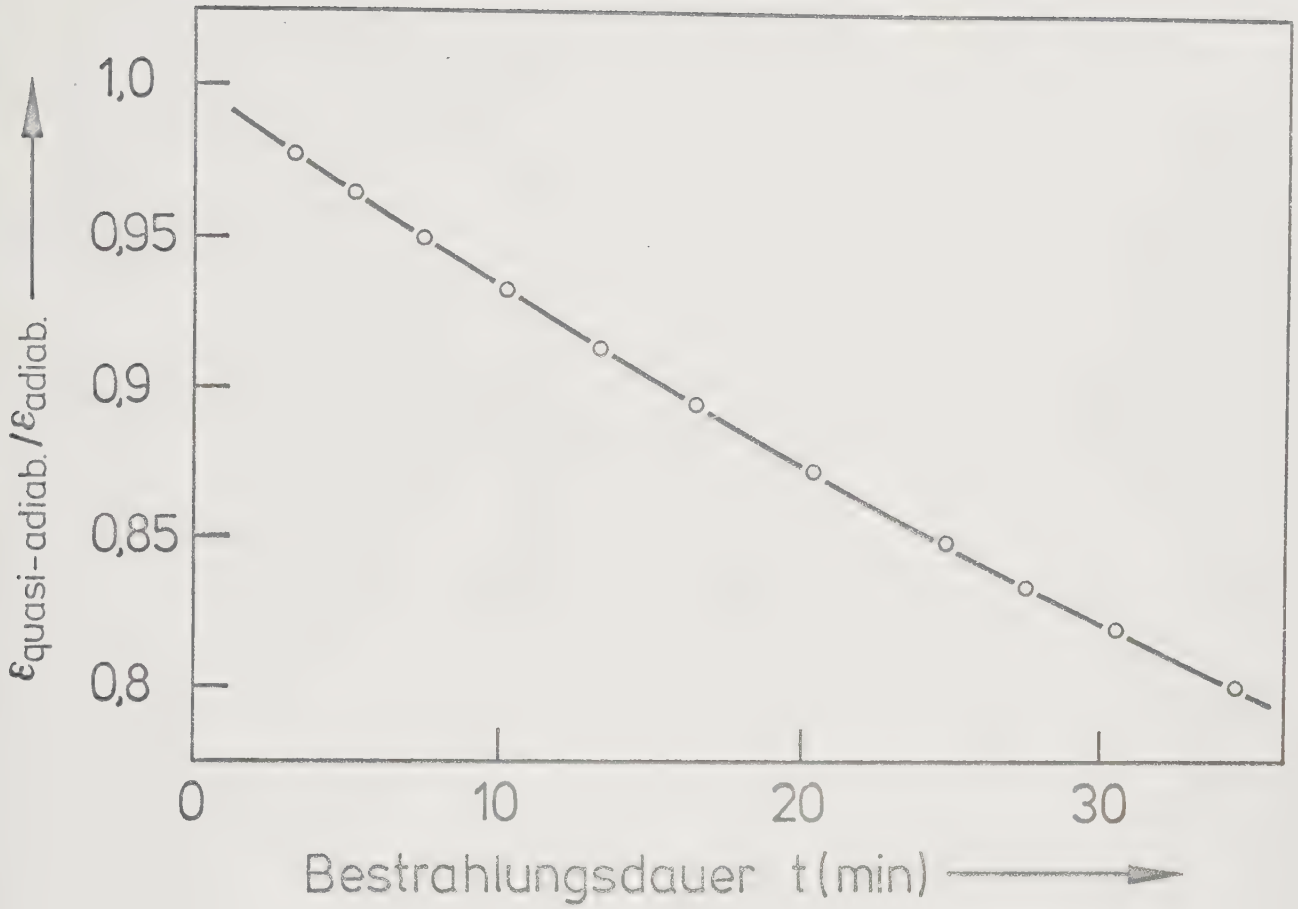


Abb. 26: Zeitliche Abhängigkeit des berechneten, dosisleistungsunabhängigen Empfindlichkeitsverhältnisses von quasi-adiabatischem zu adiabatischem Kalorimeter

Tabelle 3: Vergleich der kalorischen Meßverfahren

Meßverfahren	Art der Messung und Voraussetzungen	Empfindlichkeit	Untere Nachweisgrenze
adiabatisch	Einzelmessung der Dosisleistung, bzw. Dosis	$3{,}45 \pm 0{,}05 \frac{^{\circ}C/min}{Mrad/min}$	$\dot{D}_{min} \approx 30 \frac{rad}{min}$
quasi-adiabatisch	Einzelmessung der Dosisleistung (Dosisleistung konstant)	$3{,}40 \pm 0{,}10 \frac{^{\circ}C/min}{Mrad/min}$	$\left[\left(\frac{\Delta T}{\delta t}\right)_{min} = 10^{-4} \, ^{\circ}C/min\right]$
isotherm	Kontinuierliche Messung der Dosisleistung (Dosisleistung variabel)	$0{,}16 \pm 0{,}008 \frac{\mu W/g}{rad/min}$	$\dot{D}_{min} \approx 4$ rad/min $\left[\left(\frac{\Delta N}{m}\right)_{min} = 0{,}60 \, \mu W/g\right]$

der Heizstromstärke des Absorbers genauer gemessen werden kann als die Temperaturänderung. Hinzu kommt der entscheidende Vorteil des isothermen Dosimeters, daß Langzeitmessungen der Dosisleistung möglich sind.
Bei den adiabatischen Meßverfahren wird die untere Nachweisgrenze der Dosisleistung durch die noch meßbare Temperaturänderung bestimmt. Letztere beträgt bei den beiden adiabatischen Verfahren etwa $(dT/dt)_{min} \approx 10^{-4}$ °C/min was bei einer Dosisleistung $\dot{D}_{min} \approx 30$ rad/min und einer Meßzeit von 10 Minuten einer Temperaturänderung von 10^{-3} °C entspricht. Bei dem isothermen Verfahren beträgt die noch nachweisbare Heizleistungsänderung pro g Absorbermaterial etwa 0,6 μW/g, was mit $\eta = 0{,}96$ einer Dosisleistung $\dot{D}_{min} = 4$ rad/min entspricht. Hinsichtlich der Nachweisgrenze ist somit das isotherme Verfahren den beiden adiabatischen Verfahren erheblich überlegen.

Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Anzeige der Dosimeter ist bei allen drei Meßverfahren etwa gleich, da er nur von der Bauweise der äußeren Dosimeterkapsel und der bei allen Dosimetern gleichen Wärmeisolation zwischen dieser Kapsel und dem Absorber abhängt.
Auch hinsichtlich des experimentellen Aufwandes und der Durchführung der Messungen bietet das isotherme Meßverfahren gewisse Vorteile. Sowohl bei den beiden adiabatischen wie auch bei dem isothermen Meßverfahren ist eine Temperaturregelung erforderlich, die bei dem isothermen Verfahren deshalb einfacher ist, weil alle drei Bauelemente des Dosimeters während der Messung auf konstanter Temperatur gehalten werden. Bei dem isothermen Verfahren entfällt auch die sonst notwendige Voreichung und Widerstandsanpassung der Regelthermistoren (vgl. 3.31).

Zusammenfassend ergibt somit der Vergleich der Meßverfahren, daß das isotherme Verfahren - abgesehen von der Möglichkeit einer kontinuierlichen Dosis- bzw. Dosisleistungsmessung - sowohl in Bezug auf Genauigkeit und Empfindlichkeit der Messung als auch hinsichtlich des experimentellen Aufwandes den beiden adiabatischen Verfahren überlegen ist.

5 Anhang

Konstruktionszeichnung des Dosimeters

Schaltbilder der elektronischen Einheiten zur Heizstromregelung mit einer Wechselstrombrücke

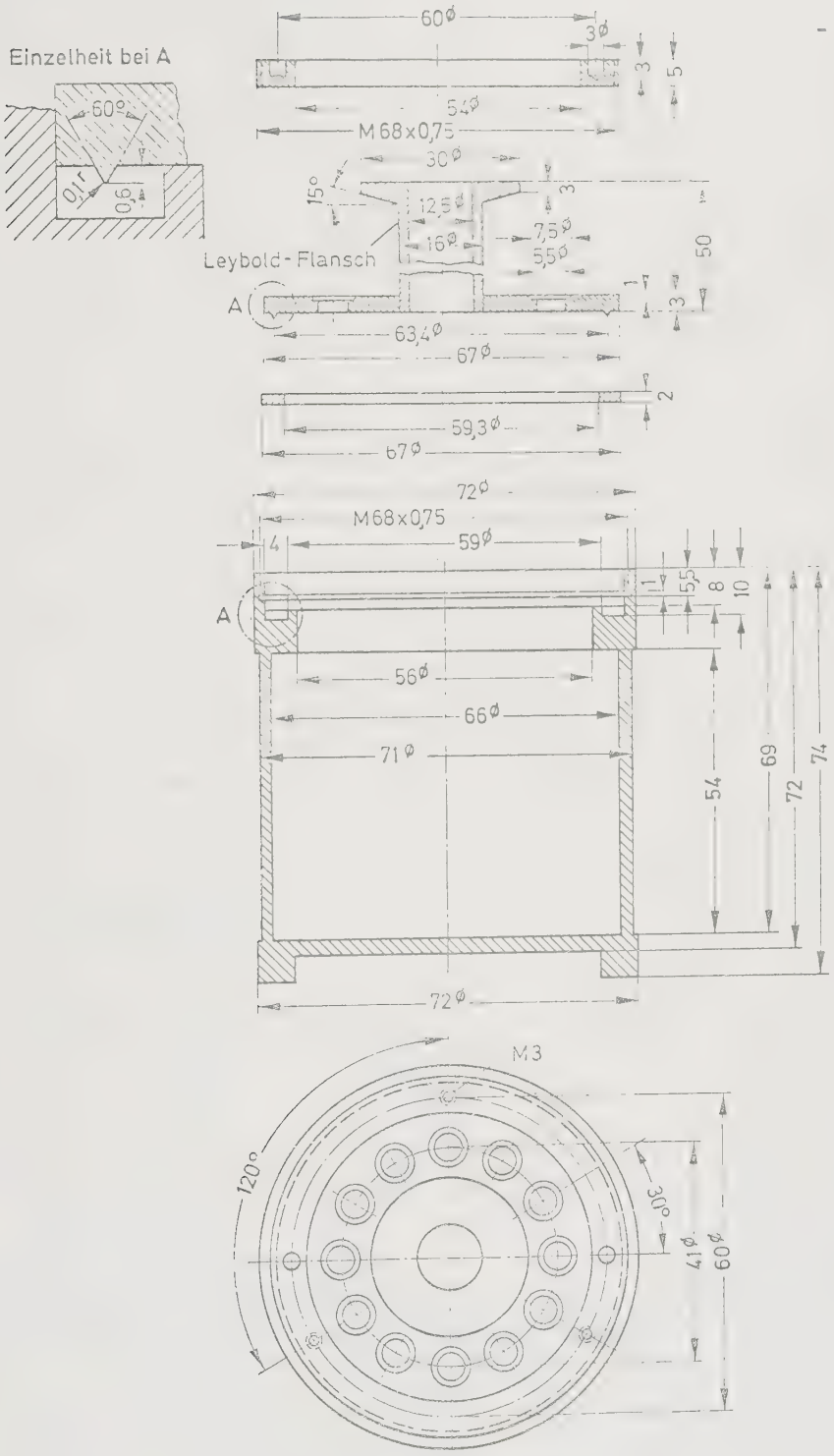
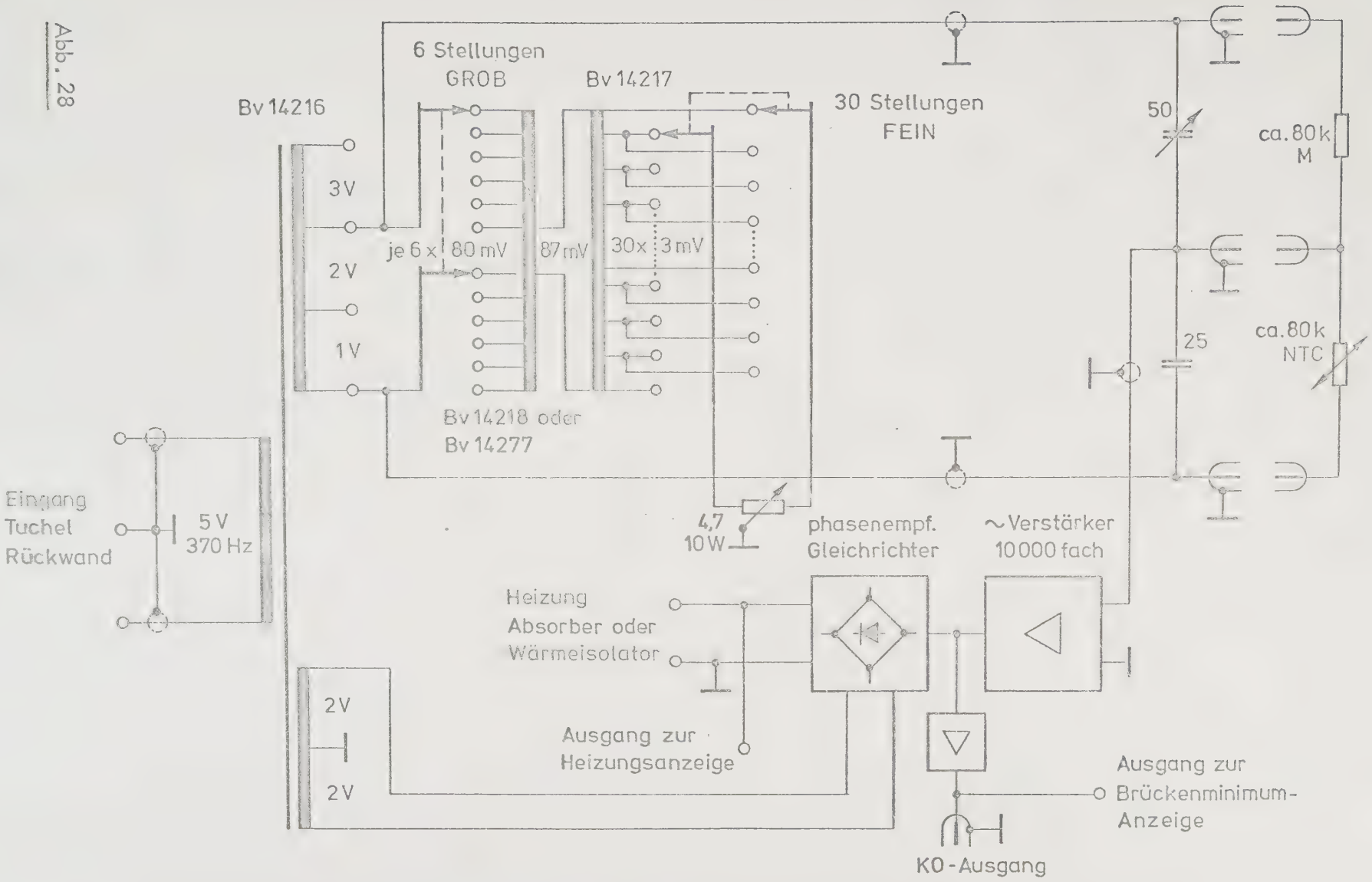
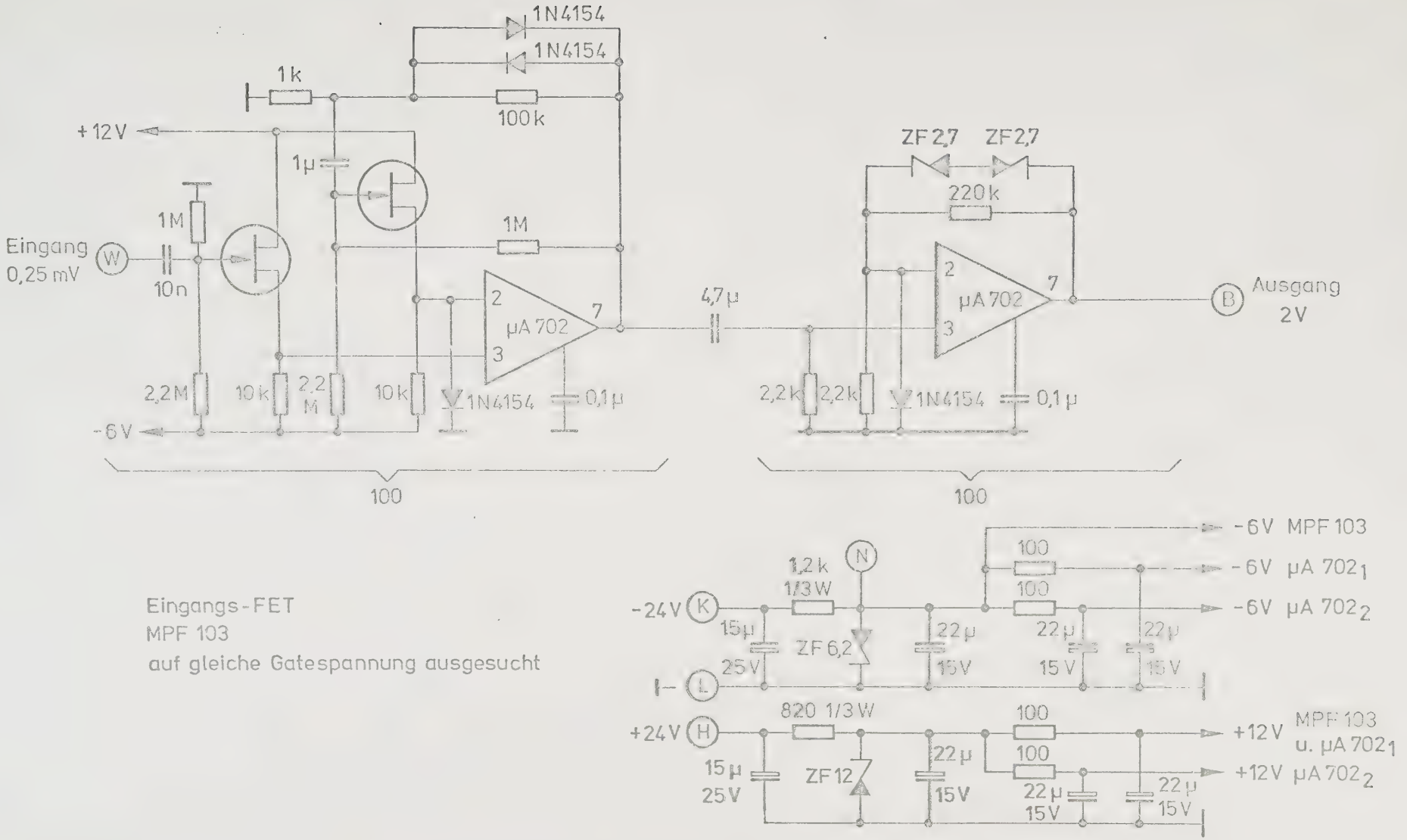


Abb. 27: Vakuum-Kalorimeter

Abb. 28



Wechselstrom-Meßbrücke



Eingangs-FET
MPF 103
auf gleiche Gatespannung ausgesucht

Abb. 29

Wechselstrom-Verstärker, 10 000 fach

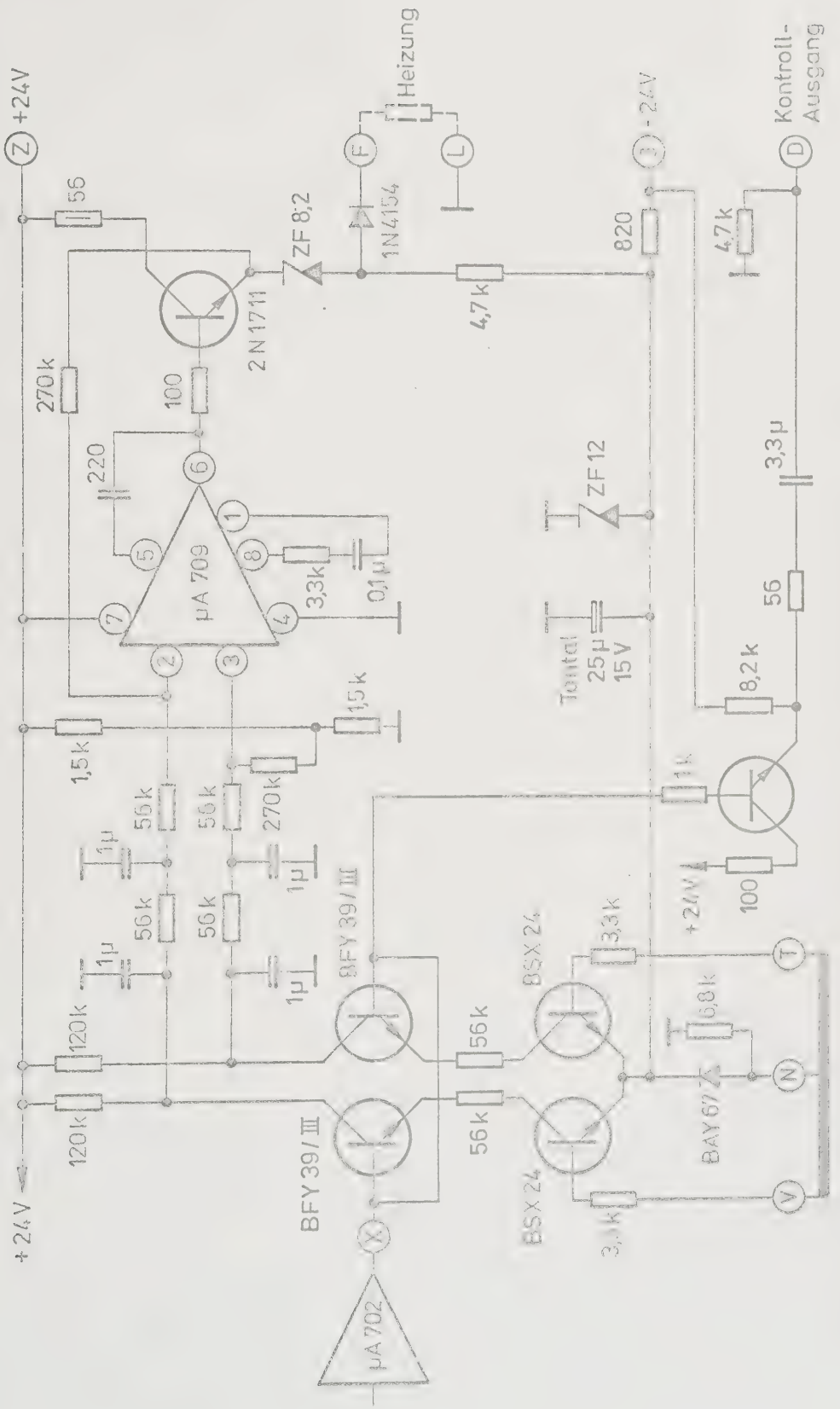
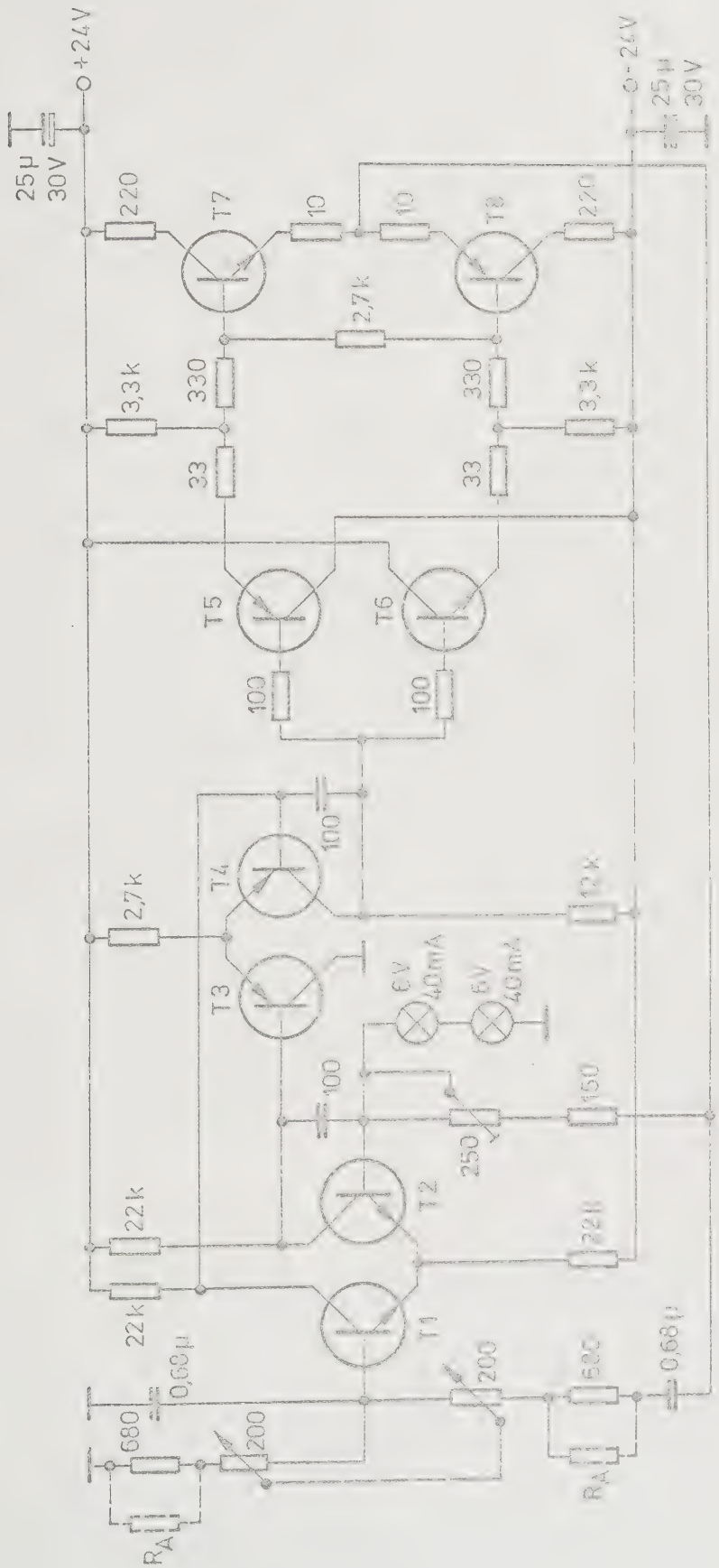

Phasenempfindlicher Gleichrichter
+24V
Z
56
270k
100
220
2N1711
ZF 8,2
F
1N4154
Heizung
L
4,7k
820
3
-24V
4,7k
D
Kontroll-Ausgang
μA 709
3,3k
0,1μ
ZF 12
3,3μ
Tantal 25μ 15V
56
8,2k
1,5k
1,5k
1μ
56k
56k
56k
56k
270k
1μ
1μ
1μ
120k
120k
BFY 39/III
BFY 39/III
56k
56k
BSX 24
BSX 24
3,3k
+24V
1k
100
6,8k
BAY 67
T
N
V
3,3k
μA 702
X
Bv 14216

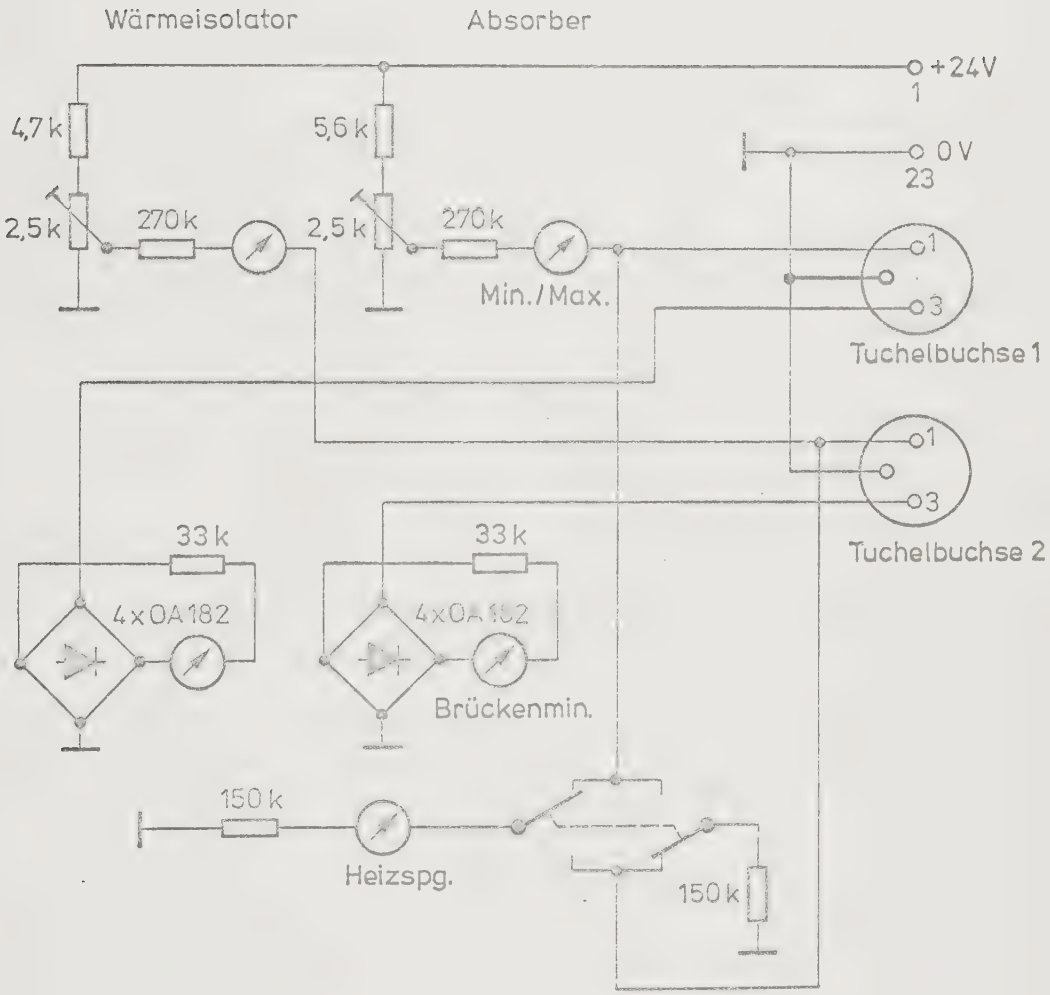
Abb. 30



T1,T2 : BFY 39/III
T3,T4 : 2N3702
T5,T8 : MM1614
T6,T7 : MM1613

Wien-Brücke und Verstärker

Abb. 31



Minim./Maxim.-Anzeige

Abb. 32

6 Literaturverzeichnis

1 Shonka, Rose und Failla
A/Conf. 15/P/753 (1958)

2 Laughlin, Genna, Danzker und Vacirca
A/Conf. 8/P/70 (1955)

3 Bewley
Brit. Journal Radiology 36 (1963) 865

4 Bradshaw
Physics in Medicine and Biology 10 (1965) 355

5 Carroll und Bolt
AECU - 3933 (1958)

6 Dove und Cole
AERE - R 3063 (1962)

7 Holm, Brynjolfsson und Maul
I.A.E.A. Symposium "Selected Topics in Radiation Dosimetry"
p. 371, Wien 1961

8 Bernier, Skarsgard, Cormack und Johns
Radiation Research 5 (1956) 613

9 Milvy, Genna, Barr und Laughlin
A/Conf. 15/P/744 (1958)

10 Reid und Johns
Radiation Research 14 (1961) 1

11 Geisselsoder, Köpke und Laughlin
Radiation Research 20 (1963) 423

12 Schleiger und Goldstein
Review of Scientific Instruments 35 (1964) 890

13 Goldstein, Schleiger und Tochilin
Health Physics 11 (1965) 829

14 Anderson und Waite
Journal of Scientific Instruments 33 (1956) 46

15 Anderson und Linacre
I.A.E.A. Symposium "Selected Topics in Radiation Dosimetry"
p. 609, Wien 1961

16 Radak und Markovics
Int. Journal of Applied Radiation and Isotopes 13 (1962) 287

17 Salander
Atomkernenergie 12 (1963) 423

18 Linacre , Taylor und Thomas
AERE - 4805 (1965)

19 Richardson, Allan und Boyle
A/Conf. 8/P/154 (1955)

20 Dyne und Thurston
AECL - 432 (1957)

21 Genna, Jaeger, Nagl und Sanielevici
Atomic Energy Review 1 (1963) 239

22 Jaeger, Nagl und Sanielevici
Strahlentherapie 126 (1965) 321

23 Sanielevici und Nagl
Strahlentherapie 127 (1965) 560

24 Schmidt und Säbel
Tagungsbericht der 4. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Berlin Mai 1969, p. 522, Strahlenschutzprobleme bei der Freisetzung und Inkorporation radioaktiver Stoffe

25 Blizard in:
Nuclear Engineering Handbook (Herausgeber: Etherington)
McGraw-Hill Book Comp., Inc., New York - London (1958)

26 Nachtigall
Physikalische Grundlagen des Strahlenschutzes
Thiemig-Verlag, München (im Druck)

27 Kennard
Kinetic Theory of Gases, McGraw-Hill, New York (1938)

28 McAdams
Heat Transmission, McGraw-Hill, New York (1942)

29 Report of the International Comission on Radiological Units and Measurements, National Bureau of Standards, Handbook 62, p. 12 (1956)

30 Rockwell
Reaktor Shielding Design Manual
Norstrand Comp., Princeton, p. 450 (1956)

31 Kohlrausch
Praktische Physik, Bd. 3, 71, 22. Auflage 1968

32 D'Ans Lax
Taschenbuch für Chemiker und Physiker
p. 1146, 2. Auflage 1949

Die vorliegende Dissertation entstand in der Abteilung Strahlenphysik des Hahn-Meitner-Instituts für Kernforschung Berlin.
Dem Leiter der Abteilung, Herrn Prof. Dr. W. Jacobi, und Herrn Dr. J. Hacke möchte ich für die Betreuung der Arbeit danken.

Den Mitarbeitern der Abteilung Strahlenphysik und Elektronik, die mir bei der Herstellung der Kalorimeter, bei der Entwicklung der elektronischen Bauelemente und bei der Durchführung der Messungen behilflich waren, gilt mein aufrichtiger Dank.

Herrn Prof. Dr. K. H. Lindenberger danke ich für die Förderung und Unterstützung dieser Arbeit.

Lebenslauf

Am 14. Februar 1930 wurde ich in Berlin geboren. Mein Vater war leitender kaufmännischer Angestellter bei der Firma Siemens & Halske AG in Berlin und Karlsruhe.

Von meinem 6. Lebensjahr besuchte ich vier Jahre lang die 11. Volksschule in Berlin-Siemensstadt. 1940 wurde ich in der Friesen-Oberrealschule in Berlin-Charlottenburg aufgenommen, nach acht Jahren beendete ich meine Schulausbildung mit dem Abitur.

Bis zu meiner Immatrikulation an der medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin 1949 arbeitete ich in einem Berliner Krankenhaus. Im April 1951 legte ich als erste akademische Prüfung nach vier vorklinischen Semestern das Physikum ab. Nach den ersten klinischen Semestern an der Freien Universität in Berlin setzte ich mein medizinisches Fach-Studium an der Georg-August-Universität in Göttingen fort und absolvierte dort die letzten vier klinischen Semester. Im Februar 1954 erkrankte ich und mußte deshalb mein Studium für ein Jahr unterbrechen. Ende 1955 legte ich an der Georg-August-Universität in Göttingen das medizinische Staatsexamen ab und promovierte an der medizinischen Fakultät der Göttinger Universität.

Als weitere Berufsausbildung für eine spätere Tätigkeit auf dem Grenzgebiet zwischen Medizin und Physik begann ich im Frühjahr 1956 an der Freien Universität in Berlin mit dem Fachstudium der Physik, 12 Semester habe ich an Vorlesungen und Übungen für Physiker teilgenommen.

1961 und 1962 bestand zwischen Prof. Zimen, Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin, und mir ein privater Dienstvertrag, finanziell gefördert von der "Deutschen Forschungsgemeinschaft" zur Durchführung von Forschungsaufgaben am HMI.

Am 1. November 1962 wurde ich vom Senator für Wissenschaft und Kunst als Wissenschaftlicher Assistent am Hahn-Meitner-Institut eingestellt und betraut mit dem Strahlenschutz in den aktiven Laboratorien und mit Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Dosimetrie. Als Abschluß meines physikalischen Fachstudiums entstand am Hahn-Meitner-Institut die Dissertation: "Ein gewebeäquivalentes Kalorimeter zur Dosimetrie in gemischten Strahlenfeldern".